

*ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES, SCIENCES DE L'INFORMATION ET  
DE L'INGÉNIEUR*

**Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de  
l'Imagerie**

**THÈSE** présentée par :

**Vivien SCHMITT**

soutenue le : **17 décembre 2013**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Mécanique des fluides

**Investigation expérimentale et numérique d'un  
ouvrage de séparation particulaire en  
assainissement**

**THÈSE dirigée par :**

**Mr VAZQUEZ José**

Professeur, ENGEES - UDS

**RAPPORTEURS :**

**Mr DARTUS Denis**

Professeur, INP-ENSEEIH - université de Toulouse

**Mr DAVID Laurent**

Professeur, Institut P' - université de Poitiers

---

**AUTRES MEMBRES DU JURY :**

**Mr CHEBBO Ghassan**

Professeur, Ecole des Ponts Paris Tech

**Mr LIPEME KOUYI Gislain**

Maître de Conférences, INSA de Lyon

**Mr DUFRESNE Matthieu**

Maître de Conférences, ENGEES - UDS



# Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué au laboratoire ICube de l'Université de Strasbourg et au sein de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg sous la direction de José Vazquez, à qui j'adresse mes premiers remerciements. Merci d'avoir accepté de me proposer un sujet de thèse reliant les aspects numériques, les expériences en laboratoire et l'expertise de terrain. Ce projet a été particulièrement formateur.

Je remercie également Matthieu Dufresne et Martin Fischer qui m'ont accompagné durant ce projet. Merci pour leur aide, leurs conseils et leur sympathie.

Je tiens aussi à remercier les sociétés Hydroconcept et Steinhardt pour leur soutien technique et la construction du pilote expérimental. Merci à Antoine, Jean-Marc, Ferroudja, Nicolas et Mme Piveteau pour leur sympathie et leur gentillesse.

Merci à tous les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mes travaux de thèse. Merci à Denis Dartus et Laurent David qui ont accepté d'être les rapporteurs du mémoire de thèse. Merci à Ghassan Chebbo d'avoir présidé le jury de thèse et d'avoir examiné mon travail. Merci également à Gislain Lipeme Kouyi d'avoir examiné mon travail et à Bertrand Côté pour sa présence lors de la soutenance.

Je remercie également le GEMCEA et Ile-de-France Innovation pour leur participation financière dans ce projet.

Un merci également à Mr Bornarel et à la communauté de Cœur-Côte-Fleurie pour la mise à disposition de l'ouvrage de Trouville-sur-mer.

Merci au personnel que j'ai croisé à l'ENGEES. Merci à Marceline, Jean-Bernard, Véronique, Dominique, Martine, Marie-Pierre, Carole, Claude et Bruno.

Merci à tous les collègues du département Mécanique de ICube. Merci à Robert Mosé, Fabrice Lawniczak, Pierre Francois, Julien Laurent, Pascal Finaud-Guyot, Adrien Wanko, Paul Bois, Michael Essa et ceux que j'oublie.

Merci à tous les doctorants et les ingénieurs que j'ai croisé et avec lesquels on a souffert jusqu'au bout, notamment autour des pauses café, des apéros et des parties de baby foot. Merci à Sandra Isel, Marie Manceau, Charlotte Tingaud, Daniel Durrenberger, Roman Houbron, Alain Petitjean, Fanny Thenault, Salma Bellhacen, Gilles Insenmann et les autres.

Merci à la team 214. Merci à mes amis, Quentin Araud, Hakim Benslimane, Ilies Bahlouli et Florent Locatelli pour m'avoir supporté pendant 3 ans. Un grand merci également à Maxime Trautmann qui a réussi à me motiver et m'a grandement soutenu dans la dernière ligne droite. Merci pour tes questions : « pourquoi, pourquoi ? »

Je remercie aussi ma famille. Un énorme merci à ma fiancée Noëlle Duclos avec qui j'ai pu partager cette aventure et qui m'a soutenu pendant les moments difficiles et qui a grandement contribué à la réussite de ma thèse. Merci également à mes parents et mon frère de m'avoir soutenu tant moralement que financièrement tout au long de mon cursus. Merci à mes beaux-parents, Marc et Sandrine, d'avoir fait le déplacement jusqu'à Strasbourg pour corriger les fautes dans mes équations. Merci aussi à Papet et Mamie Janine pour leur contribution dans les premières pages du contexte.

Enfin, je remercie tous mes amis, ceux qui ont fait le déplacement pour la soutenance (Zico, Geo, Sokhna, Nico, Lucie, Christelle, ...) et ceux qui n'ont pas pu venir et qui m'ont toujours encouragé (Dan, Laurianne, Greg, Alex, ...). Merci également à mes amis du tennis club de Wissembourg d'avoir continué le projet du TCW sans moi, merci pour leur compréhension et leur soutien. Merci à vous Philippe, Stéphane, Nico, Franck, Christine, Charles, Albrecht et les autres.

Vivien Schmitt

Janvier 2014



# SOMMAIRE

<b>Contexte</b> .....	<b>7</b>
<b>Problématique</b> .....	<b>12</b>
<b>Objectifs et démarche</b> .....	<b>13</b>
<b>Partie 1</b>	
<b>Etude bibliographique</b> .....	<b>15</b>
<b>Introduction de la partie 1</b> .....	<b>16</b>
<b>I. Description technique du fonctionnement des séparateurs hydrodynamiques</b> .....	<b>17</b>
1. Rôle des séparateurs hydrodynamiques en assainissement.....	17
2. Description technique des séparateurs hydrodynamiques disponibles ou existants .....	17
<b>II. Description scientifique du fonctionnement des séparateurs</b> .....	<b>21</b>
1. Description scientifique des écoulements dans les ouvrages de séparation particulière .....	21
2. Description scientifique du transport solide dans les ouvrages .....	27
<b>III. Description des écoulements et du transport solide à travers une grille</b> .....	<b>36</b>
1. Comportement hydrodynamique global à proximité d'une grille .....	36
2. Influence de la géométrie sur l'écoulement.....	38
3. Comportement hydrodynamique à l'échelle de l'orifice.....	41
<b>IV. Modélisation numérique et approches multi-échelles</b> .....	<b>44</b>
1. Modélisation numérique des écoulements et du transport solide dans les ouvrages .....	44
2. Les approches multi-échelles .....	51
<b>Conclusion de la partie 1</b> .....	<b>56</b>
<b>Partie 2</b>	
<b>Etude expérimentale</b> .....	<b>59</b>
<b>Introduction de la partie 2</b> .....	<b>60</b>
<b>Dispositif expérimental</b> .....	<b>61</b>
1. Pilote expérimental .....	61
2. Instrumentation et incertitudes.....	67
3. Transport solide.....	75
<b>I. Caractéristiques hydrodynamiques</b> .....	<b>79</b>
1. A l'échelle de l'ouvrage .....	79
2. A l'échelle de la grille .....	97
<b>II. Transport solide</b> .....	<b>102</b>
1. Efficacité du pilote à retenir les macro-déchets.....	102
2. Efficacité du pilote à retenir des particules .....	106
<b>Conclusion de la partie 2</b> .....	<b>113</b>

<b>Partie 3</b>	
<b>Modélisation numérique.....</b>	<b>115</b>
<b>Introduction de la partie 3 .....</b>	<b>116</b>
<b>I. Modélisation numérique multi-échelle .....</b>	<b>117</b>
1. Description de la méthodologie multi-échelle .....	118
2. Adaptation de la méthode au séparateur hydrodynamique .....	120
<b>II. Description des modèles .....</b>	<b>124</b>
1. Modèle local - à l'échelle de la grille .....	124
2. Modèle global - à l'échelle de l'ouvrage.....	130
3. Modélisation du transport solide.....	135
<b>Conclusion de la partie 3 .....</b>	<b>139</b>
<b>Partie 4</b>	
<b>Validation de la méthode numérique .....</b>	<b>141</b>
<b>Introduction de la partie 4 .....</b>	<b>142</b>
<b>I. Comportement hydrodynamique à l'échelle de la grille .....</b>	<b>143</b>
1. Confrontation des modèles de turbulence.....	144
2. Comparaison entre le modèle <i>RSM</i> et les données expérimentales .....	150
3. Description des phénomènes physiques à proximité de la grille .....	153
4. Etude en régime instationnaire.....	155
5. Etude de l'influence du débit.....	159
<b>II. Comportement hydraulique à l'échelle de l'ouvrage.....</b>	<b>162</b>
1. Evaluation de l'incertitude numérique .....	163
2. Confrontation des modèles de turbulence.....	166
3. Comparaison avec l'expérimental (débit nominal) .....	168
<b>III. Transport solide .....</b>	<b>177</b>
1. Etude du transport solide à proximité de la grille .....	177
2. Etude du transport solide dans le pilote .....	184
<b>Conclusion de la partie 4 .....</b>	<b>191</b>
<b>Partie 5</b>	
<b>Utilisation des modèles pour optimiser le fonctionnement des ouvrages</b>	<b>193</b>
<b>Introduction de la partie 5 .....</b>	<b>194</b>
<b>I. Optimisation à l'échelle globale.....</b>	<b>195</b>
1. Comportement hydraulique avec les aménagements.....	195
2. Influence des aménagements sur le transport solide.....	201
<b>II. Optimisation à l'échelle locale .....</b>	<b>204</b>

1. Influence du type de grille .....	204
2. Influence de l'inclinaison des bandelettes de métal .....	211
3. Transport solide.....	214
<b>Conclusion de la partie 5 .....</b>	<b>220</b>
<b>Partie 6</b>	
<b>Etude d'un ouvrage grandeur nature .....</b>	<b>221</b>
<b>Introduction de la partie 6 .....</b>	<b>222</b>
<b>I. Etude expérimentale.....</b>	<b>223</b>
1. Situation géographique et données topographiques.....	223
2. Instrumentation du site.....	225
3. Analyse des données .....	227
4. Exploitation et Maintenance - Analyse qualitative de l'efficacité.....	233
<b>II. Modélisation numérique de l'ouvrage .....</b>	<b>236</b>
1. Analyse du comportement hydraulique global .....	236
<b>Conclusion de la partie 6 .....</b>	<b>242</b>
<b>Conclusion générale et Perspectives.....</b>	<b>243</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>249</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>258</b>
<b>Annexe A : Répétabilité et reproductibilité des mesures .....</b>	<b>259</b>
1. Test de reproductibilité .....	259
2. Test de répétabilité .....	260
<b>Annexe B : Modélisation numérique 3D .....</b>	<b>262</b>
1. Modélisation numérique des écoulements .....	262
2. Modélisation du transport solide.....	274
<b>Annexe C : Détermination du débit a partir des hauteurs d'eau à l'aval du déversoir</b>	<b>279</b>
1. Calcul de la hauteur critique .....	279
2. Calcul des pertes de charge due a l'engouffrement.....	280



### La pollution par les macro-déchets

Qualifiée de "pollution visuelle", les macro-déchets sont désormais considérés comme une forme de pollution ayant un réel impact sur l'écosystème. Depuis une dizaine d'années, les recherches menées sur la thématique des macro-déchets ont prouvé leur influence néfaste, en particulier sur les animaux marins qui ingèrent des micro-fragments issus de la dégradation du plastique sous l'effet des rayons UV en les confondant avec de la nourriture (Derraik, 2002 ; Cooper et al., 2010 ; Moret-Ferguson, 2010 ; Collignon et al., 2012). Ce phénomène est visible aussi bien au niveau des fonds marins (Anastasopoulou et al., 2013) qu'au niveau de la faune en surface (Burgoni, 2001 ; Lazar et al., 2011). La *Figure 1* permet d'illustrer ces propos en montrant les fragments de plastiques présents dans l'estomac d'un albatros. Ce constat prouve que les macro-déchets font malheureusement partie de notre chaîne alimentaire.



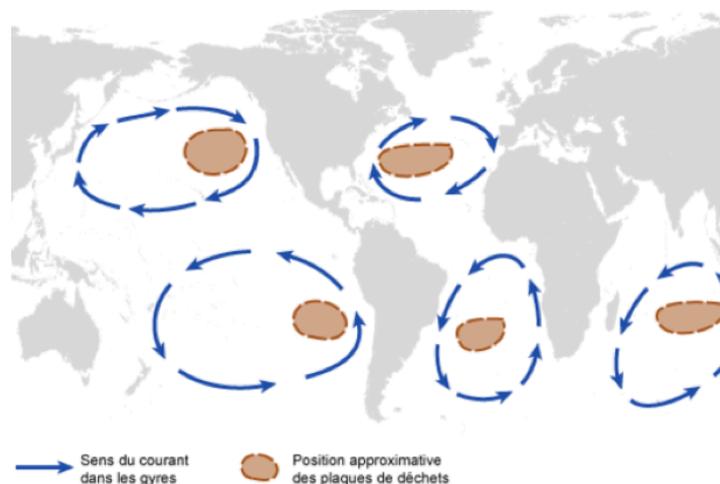
*Figure 1. Conséquences des macro-déchets sur l'écosystème (source mountain-riders.com)*

En France, de nombreux organismes dénoncent cette pollution. Les associations les plus connues, par exemple Surfrider, SOS Mal de Seine ou Mer-Terre, participent activement à la protection de l'environnement en organisant des campagnes de nettoyage. Ces campagnes ont également pour but de recenser les types de polluants présents et d'observer leur évolution au fil des ans. Le protocole européen OSPAR (2013) consiste à ramasser les déchets sur une distance de 100 mètres le long des berges et des plages. Il a permis par exemple d'observer une croissance d'environ 30 % en un an du nombre de morceaux de plastique sur les berges de la Seine (Boitelle, 2013).

A force d'être le sujet de nombreux documentaires télévisés ou articles de journaux (*Tableau 1*), la société commence à prendre conscience des risques de cette pollution sur l'environnement. Les conséquences à l'échelle de la planète sont considérables. Les déchets s'agglomèrent avec les courants marins et forment des "continents de plastiques". La plupart des documents cités dans le *Tableau 1* font référence aux nombreuses expéditions qui ont permis de découvrir ces grandes zones d'agglomération (*Figure 2*). La part de macro-déchets retrouvée en mer et provenant des terres est estimée à 80 % (GESAMP, 1991). Ainsi, on peut considérer qu'une part importante de ces déchets, d'origine anthropique, transite via les systèmes d'assainissement.

<i>Documents</i>	<i>Date</i>
"Les océans malades du plastique" - Science & Vie	août 2009
Documentaire "Plastiques, alerte aux toxiques" - France Télévisions	16/12/2010
Documentaire "Mer de plastique" - Arte	20/02/2011
"La Méditerranée et le plastique" - Science & Vie	mars 2011
Documentaire "Méditerranée, mer de plastique" - France Télévisions	04/08/2011
"Le 7e continent de plastique" - Le Monde	05/09/2012
"Sur 100 m de berges de la Seine, 17000 déchets échoués en un an" - Le Monde	09/08/2013
"Pollution de la Seine, une association tire la sonnette d'alarme" - RFI	11/08/2013
"Plastiques : pourquoi s'alarme-t-on soudain qu'ils polluent les mers ?" - Science & Vie	août 2013
"Capbreton : la pêche aux macro-déchets" - France 3 Aquitaine	04/09/2013
"La Seine malade de ses déchets" - Paris-Normandie	03/09/2013

*Tableau 1. Actualités récentes en lien avec la pollution par les macro-déchets*



*Figure 2. Les 5 principales plaques de macro-déchets (tiré de l'article Le Monde "Le 7e continent de plastique", 2012)*

A travers le reportage "La Méditerranée, mer de plastique", diffusé sur France Télévisions, les téléspectateurs ont pu observer le rôle des systèmes d'assainissement pluviaux dans le transfert des polluants vers le milieu naturel. Un plongeur a réussi à filmer la présence de macro-déchets dans un déversoir d'orage situé à quelques mètres de la mer (*Figure 3*).



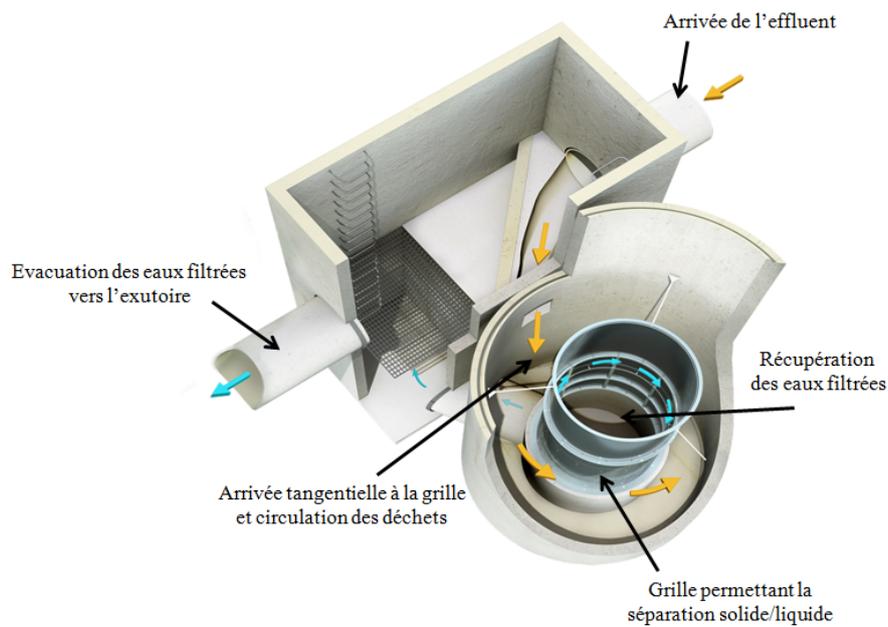
*Figure 3. Macro-déchets dans un déversoir d'orage avant rejet en mer (extrait de France Télévisions, 2010)*

Ce constat montre donc que la protection du milieu naturel passe par l'installation d'ouvrages spécifiques dans les réseaux d'assainissement. Les ouvrages classiquement utilisés pour capturer ce type de déchets sont des dégrilleurs. Cependant, face à la quantité et au volume conséquent à capturer, les ouvrages se colmatent rapidement et nécessitent une maintenance régulière.

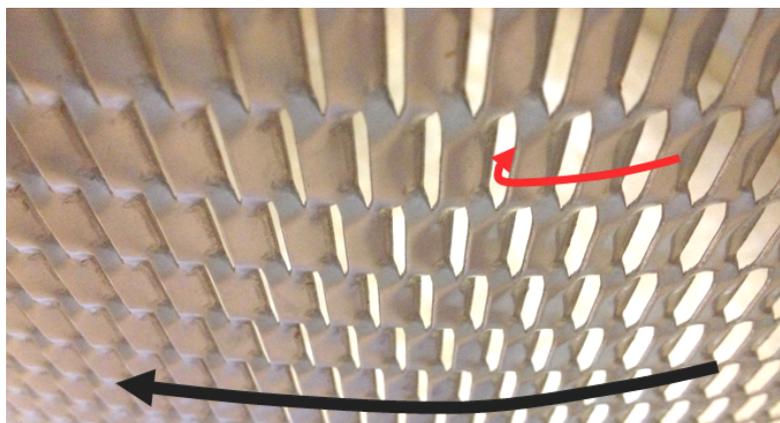
### **Le projet CycloneSep<sup>®</sup>**

Face à cette pollution de plus en plus dénoncée, la société Hydroconcept<sup>®</sup>, spécialisée dans les équipements de traitement des eaux pluviales, a souhaité proposer une solution en développant un séparateur hydrodynamique utilisant le principe de séparation tangentielle le long d'une grille (ouvrage cité dans le Grenelle de la Mer, 2010).

Le fonctionnement de l'ouvrage, illustré sur la *Figure 4*, consiste à diriger l'effluent dans un bassin de forme cylindrique. L'effluent est ensuite dirigé tangentiellement à la grille de manière à assurer un mouvement de rotation permanent de l'écoulement et des déchets dans l'objectif de limiter le colmatage. De plus, une forme particulière de la grille a été choisie. Les ouvertures spécifiques ont pour objectifs d'expulser les déchets à proximité immédiate de la grille (*Figure 5*). Les déchets sont ainsi retenus dans la partie extérieure de l'ouvrage et sont récupérés lorsque le volume à l'extérieur de la grille ne peut plus accueillir de polluants. Les eaux "filtrées" sont récupérées dans la partie centrale puis évacuées vers le siphon puis vers la conduite déversant ces eaux dans le milieu naturel.



**Figure 4. Principe de fonctionnement de l'ouvrage de séparation CycloneSep®**



**Figure 5. Grille de type métal déployé du CycloneSep® (vue de l'extérieur de la grille)**

Cet ouvrage circulaire est, d'un point de vue technique, très simpliste, puisqu'il permet par son mouvement circulaire de limiter le colmatage et ne nécessite aucune énergie extérieure. En revanche, d'un point de vue hydraulique, l'ouvrage est d'une grande complexité : écoulement en rotation, principe de séparation tangentielle, influence de la grille, perte de charge des diverses singularités à prendre en compte dans le dimensionnement,...

Dans ce contexte, une collaboration entre la société Hydroconcept® et l'équipe de recherche Mécanique des Fluides de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg a été mise en place. Le rôle du laboratoire de recherche est de mettre en avant son expertise scientifique, notamment en matière de modélisation numérique 3D, pour mieux comprendre le fonctionnement de

l'ouvrage, aussi bien au niveau du comportement hydraulique qu'au niveau du transport solide. En effet, les outils de modélisation numérique 3D sont devenus des techniques incontournables dans la prévision des écoulements et du transport solide. En revanche, les modèles numériques nécessitent d'être validés. L'utilisation d'une approche expérimentale devient ainsi complémentaire. Pour ces raisons, le soutien technique d'Hydroconcept® a permis de construire un ouvrage pilote permettant de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu dans l'ouvrage mais aussi de générer une banque de données permettant de valider les modèles numériques.

## PROBLEMATIQUE

---

Les problématiques à soulever dans ce travail de thèse sont techniques et scientifiques.

Techniquement, les ouvrages de séparation munis de grille et utilisés dans les réseaux d'assainissement sont sensibles au colmatage. En effet, au bout d'un certain temps, l'ensemble des déchets accumulés dans l'ouvrage viendra se rapatrier vers la grille et perturber le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage. Pour limiter les phénomènes de colmatage, les techniques de séparation tangentielle sont souvent employées pour éviter un plaquage direct des déchets et une obturation des orifices de la grille. Cette technique de séparation est utilisée dans le CycloneSep<sup>®</sup>. Ainsi, l'efficacité de l'ouvrage est jugée autant sur sa capacité à retenir les polluants que sur les phénomènes éventuels de colmatage. En faisant l'hypothèse que le transport solide est régi par l'écoulement, on peut supposer que l'efficacité d'un ouvrage équipé d'une grille dépend aussi bien du comportement hydraulique global de l'ouvrage que des phénomènes physiques à proximité de la grille. Nous sommes donc confrontés à une problématique technique importante : la forme de la grille, la taille des ouvertures, la forme des ouvertures ... influencent-ils les phénomènes physiques locaux et quelles sont les incidences de ces propriétés sur l'écoulement à l'échelle de l'ouvrage?

Pour optimiser le fonctionnement d'un ouvrage, l'approche numérique 3D est très certainement la plus intéressante. Elle permet de tester à moindre coût plusieurs configurations ou aménagements permettant d'optimiser l'écoulement. Cette approche présente cependant un inconvénient majeur : le modèle numérique doit être validé. D'autre part, l'applicabilité d'un modèle est jugée sur sa capacité à reproduire les phénomènes que l'on souhaite observer. Dans le cas du séparateur CycloneSep<sup>®</sup>, les phénomènes que l'on veut reproduire concernent les phénomènes physiques à proximité de la grille ainsi que le comportement global de l'ouvrage. Cependant, le maillage à adopter pour reproduire ces deux phénomènes, situés à des échelles spatiales différentes, nécessite des moyens informatiques extrêmement puissants. Nous sommes donc confrontés à des problématiques liées à la discrétisation spatiale de l'ouvrage : quelle approche utiliser pour modéliser l'écoulement dans un tel ouvrage? Est-ce que les modèles de transport solide sont adaptés à cette approche? Quel est le domaine de validité de la méthode numérique?

## OBJECTIFS ET DEMARCHE

---

L'objectif à long terme est d'améliorer le fonctionnement de l'ouvrage. Pour remplir ces objectifs nous proposons deux approches : la modélisation numérique 3D et l'approche expérimentale.

En se basant sur les travaux expérimentaux en laboratoire ou de terrain, ainsi que sur les travaux de modélisation déjà réalisés par le passé, différents objectifs ont été fixés dans ce travail de thèse :

- développer une méthodologie numérique permettant de modéliser les écoulements à différentes échelles spatiales au sein d'un ouvrage hydraulique
- étudier les différents phénomènes physiques mis en jeu à l'échelle de l'ouvrage ainsi qu'à proximité de la grille en utilisant différentes grilles dans le pilote expérimental
- étudier l'efficacité de l'ouvrage face au transport solide et observer l'influence de la grille
- valider l'approche numérique en confrontant les résultats avec les données expérimentales
- utiliser les modèles numériques pour essayer d'optimiser l'ouvrage
- étudier le fonctionnement et l'efficacité d'un ouvrage grandeur nature

Ce manuscrit se décompose en six parties.

La première partie fait une synthèse bibliographique des différentes études expérimentales et numériques permettant de justifier les deux approches mises en place dans la thèse. Cette partie présente un état de l'art sur les différents ouvrages de séparation existants, l'influence d'une grille sur les écoulements dans les ouvrages ainsi que les techniques de modélisation 3D.

La seconde partie concerne l'étude expérimentale sur le pilote installé au laboratoire. L'étude du comportement hydraulique de l'ouvrage et l'influence des grilles sur l'écoulement et le transport solide y sont présentés.

La troisième partie présente la méthode numérique multi-échelle développée dans la thèse et permettant de modéliser les écoulements à proximité de la grille et à l'échelle de l'ouvrage. Après une description générale de la méthodologie, nous décrivons les modèles utilisés.

La quatrième partie concerne la validation de la méthode numérique en confrontant les résultats des simulations avec les données expérimentales de la *Partie 2*. Cette comparaison permettra de définir le domaine de validité ainsi que les limites de la méthode numérique.

La cinquième partie s'attache à mettre en œuvre la méthodologie développée pour optimiser le fonctionnement de l'ouvrage.

La dernière partie concerne l'étude d'un ouvrage grandeur nature. La communauté de *Cœur-Côte Fleurie* nous a permis d'exploiter le CycloneSep® de Trouville-sur-Mer. L'ouvrage a été instrumenté dans l'optique de visualiser le fonctionnement hydraulique d'un ouvrage de terrain. Un relevé topographique a également permis de reconstruire un modèle numérique 3D.

# PARTIE 1

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

<b>Introduction de la partie 1 .....</b>	<b>16</b>
<b>I. Description technique du fonctionnement des séparateurs hydrodynamiques .....</b>	<b>17</b>
1. Rôle des séparateurs hydrodynamiques en assainissement.....	17
2. Description technique des séparateurs hydrodynamiques disponibles ou existants .....	17
<b>II. Description scientifique du fonctionnement des séparateurs .....</b>	<b>21</b>
1. Description scientifique des écoulements dans les ouvrages de séparation particulaire .....	21
2. Description scientifique du transport solide dans les ouvrages .....	27
<b>III. Description des écoulements et du transport solide à travers une grille .....</b>	<b>36</b>
1. Comportement hydrodynamique global à proximité d'une grille .....	36
2. Influence de la géométrie sur l'écoulement.....	38
3. Comportement hydrodynamique à l'échelle de l'orifice.....	41
<b>IV. Modélisation numérique et approches multi-échelles .....</b>	<b>44</b>
1. Modélisation numérique des écoulements et du transport solide dans les ouvrages .....	44
2. Les approches multi-échelles .....	51
<b>Conclusion de la partie 1 .....</b>	<b>56</b>

# INTRODUCTION DE LA PARTIE 1

L'objectif de ce chapitre est de dresser un état actuel des connaissances sur les ouvrages de séparation particulière en assainissement et plus particulièrement sur les ouvrages utilisant des techniques de séparation à travers une grille. Les approches expérimentales et numériques seront abordées dans cette partie.

La problématique majeure relative à ce type d'ouvrage concerne le colmatage de la grille. Ainsi, pour limiter les processus de colmatage, il est essentiel de connaître les propriétés de l'écoulement au sein de l'ouvrage. Ainsi, après un descriptif du rôle et du fonctionnement des séparateurs hydrodynamiques utilisés en assainissement, nous nous intéresserons à la complexité des écoulements dans ces ouvrages en insistant sur l'influence de la forme de l'ouvrage. L'idée de cette partie est de déterminer les formes d'écoulement et les phénomènes physiques permettant d'influencer le transport solide.

D'un point de vue hydraulique, l'insertion d'une grille au sein d'un ouvrage provoque des pertes de charge. La connaissance de ces pertes de charge est essentielle pour un bon dimensionnement de l'ouvrage. Cette recherche bibliographique doit donc nous permettre de comprendre l'influence des grilles sur les propriétés globales de l'écoulement. D'autre part, l'un des objectifs de cette thèse est d'observer l'influence des phénomènes locaux produits par la forme de la grille sur les processus de colmatage. De ce fait, nous nous sommes appuyés sur des articles scientifiques pour mieux comprendre les différents phénomènes physiques produits à proximité immédiate des grilles.

Les écoulements dans les ouvrages peuvent être modélisés en utilisant les techniques numériques 3D. Cette approche, qui permet de tester à moindre coût différentes configurations, a souvent été appliquée aux ouvrages hydrauliques. L'application de cette technique doit notamment permettre, dans le cadre de cette thèse, d'optimiser l'ouvrage. Techniquement, l'utilisation d'un modèle déterministe pour modéliser l'écoulement dans l'ouvrage ainsi que les phénomènes locaux à proximité de la grille, nécessite un maillage à la fois fin et volumineux. Une telle modélisation est donc très contraignante car elle nécessite des moyens informatiques extrêmement puissants. Face à cette problématique, nous avons cherché dans la littérature les différentes techniques permettant de modéliser des phénomènes multi-échelles. D'autre part, une revue des différents modèles numériques utilisés pour reproduire les écoulements et le transport solide dans les ouvrages seront abordés dans cette partie.

# I. DESCRIPTION TECHNIQUE DU FONCTIONNEMENT DES SEPARATEURS HYDRODYNAMIQUES

## 1. ROLE DES SEPARATEURS HYDRODYNAMIQUES EN ASSAINISSEMENT

Les séparateurs hydrodynamiques sont des ouvrages hydrauliques de type "intensif" permettant de séparer les particules de l'écoulement par un traitement "au fil de l'eau". Ce type d'ouvrage a la particularité de fonctionner sans apport d'énergie extérieure puisque l'action rotationnelle de l'eau suffit à mettre en mouvement le système lors d'un événement pluvieux.

La première génération de séparateurs est apparue dans les années 60 en Angleterre dans l'objectif de récupérer les polluants rejetés par les déversoirs d'orage (Smisson, 1967 cité par Andoh & Saul, 2003). Aujourd'hui, on dénombre plus de 1500 installations (Andoh & Saul, 2003 ; Andoh et al., 2002), dont les objectifs sont soit d'éviter le rejet direct de polluants dans le milieu naturel via les réseaux séparatifs pluviaux, soit de capturer les polluants issus des surverses de déversoirs d'orage (Figure 6). Si la deuxième option est privilégiée dans les pays Anglo-saxons (législation *AssetManagementPlan*), on retrouve en France très peu de séparateurs. La *Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin* (DCSMM, 2008) de 2008 incite cependant les collectivités à installer ce type d'ouvrages afin de réduire le rejet de polluants vers le milieu naturel via les réseaux d'assainissement.

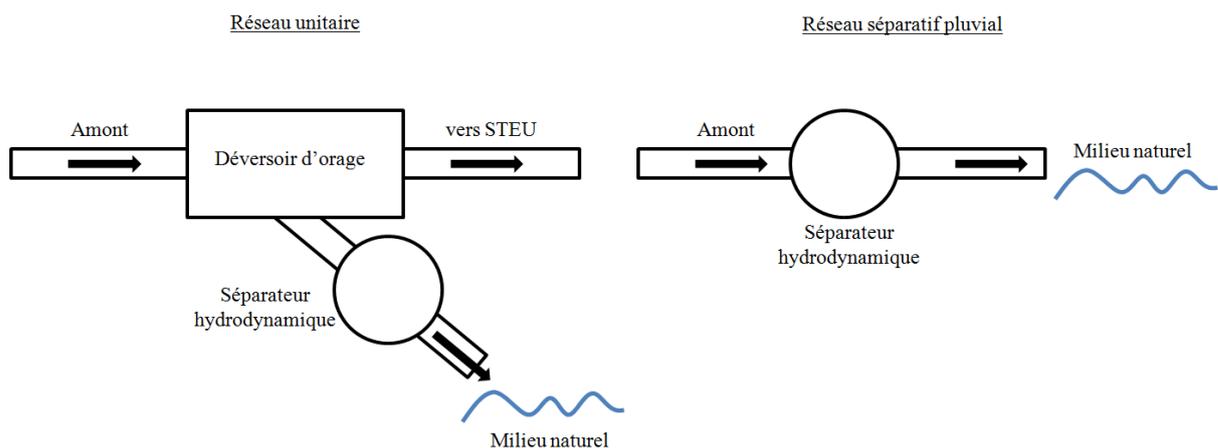
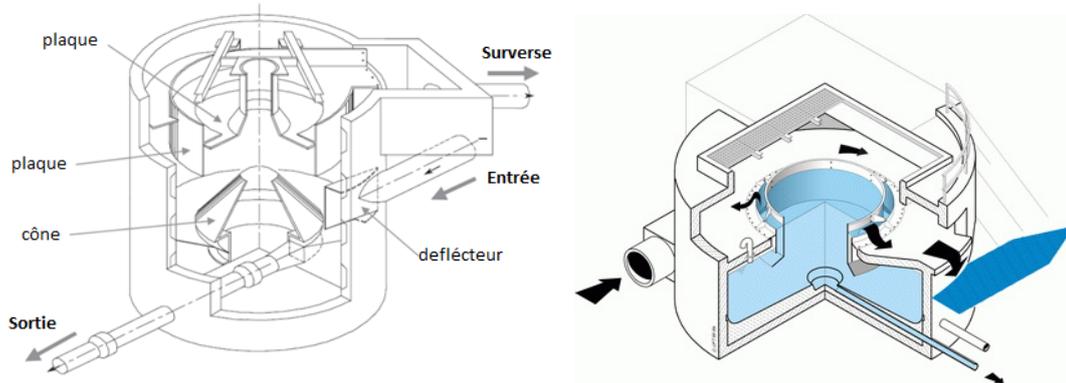


Figure 6. Points névralgiques pour l'installation des séparateurs hydrodynamiques

## 2. DESCRIPTION TECHNIQUE DES SEPARATEURS HYDRODYNAMIQUES DISPONIBLES OU EXISTANTS

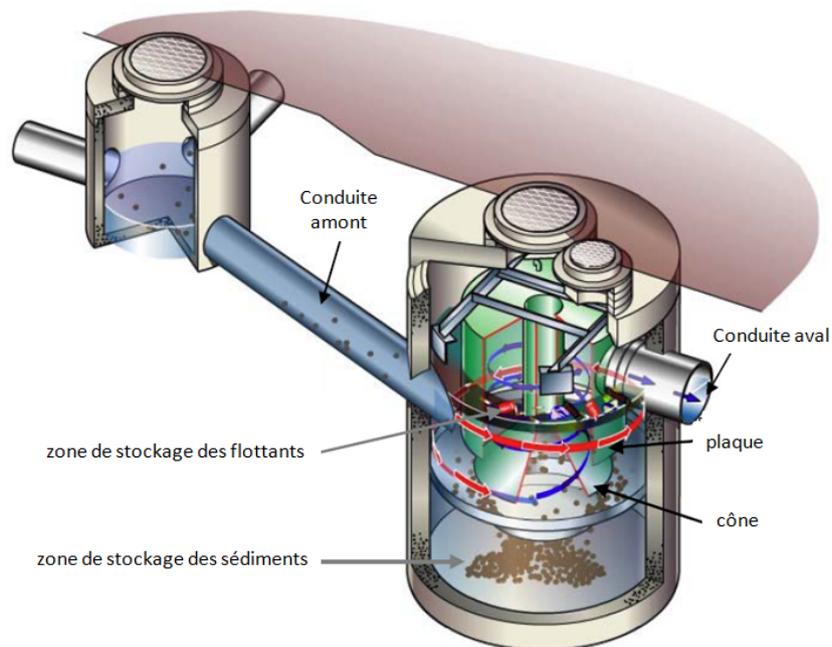
On retrouve dans la littérature un nombre important de séparateurs qui ont fait l'objet de brevets. Le mode de fonctionnement est bien souvent propre à chaque séparateur. Le fonctionnement des premiers ouvrages était basé sur la séparation par effet vortex (Smisson, 1967 cité par Andoh & Saul, 2003).

L'effluent chargé en polluants tourne dans un bassin cylindrique et les particules décantent tout en étant orientées vers le centre de l'ouvrage. Dans ces ouvrages, les "eaux claires" repartent par une surverse située dans la partie supérieure de l'ouvrage (*Figure 7*).



*Figure 7. Séparateurs Storm-King™ (Andoh & Saul, 2003) et FluidSep™ (UFT, 2013)*

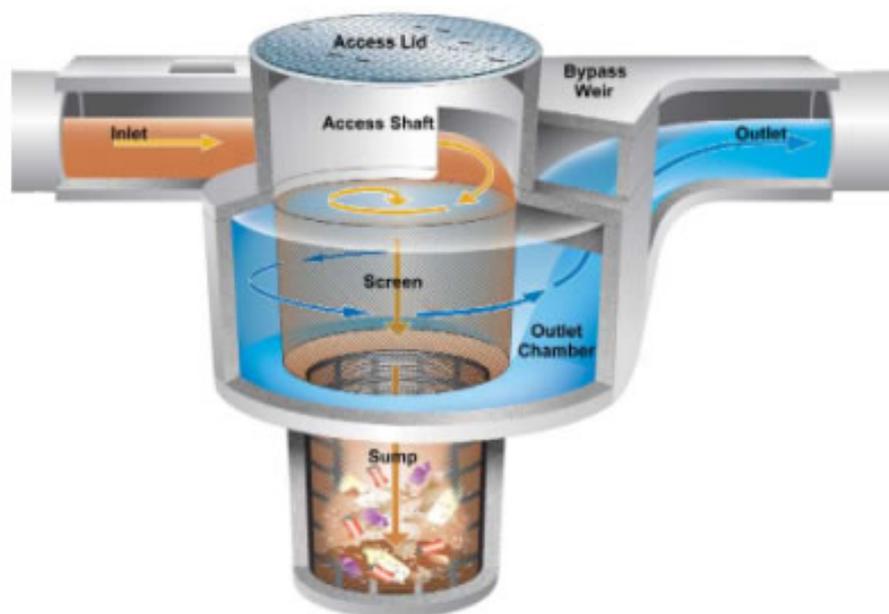
D'autres variantes basées sur l'effet vortex ont été brevetées. Le *Downstream Defender®* incorpore une cloison siphonoïde pour capturer les flottants ainsi qu'une paroi conique permettant de favoriser la sédimentation des matières en suspensions (*Figure 8*).



*Figure 8. Downstream Defender® (Andoh et al., 2002)*

A la fin des années 90, les techniques de séparation tangentielle ont été développées pour les séparateurs. L'utilisation de ce type de technique est en rapport étroit avec la mise en place de réglementations anglo-saxonnes (*legislation AssetManagementPlan*) qui imposent l'installation de grilles dont la taille des ouvertures est au minimum de 6 mm par 6 mm (Andoh & Saul, 2003). On parle de séparateurs de dernière génération pour ces ouvrages utilisant la technique de séparation tangentielle à l'aide d'une grille. A l'inverse d'une séparation directe (comme les dégrilleurs par exemple), on attribue à la séparation tangentielle la limitation du colmatage et la diminution de la maintenance du système. Cette technologie appelée "CDS" pour *Continuous Deflective Separation* est aujourd'hui très répandue sur les séparateurs (Wong et al., 1996 ; USEPA, 1999 ; Andoh & Saul, 2003 ; Pathapati and Sansalone, 2009). Dans ces ouvrages, les eaux chargées sont dirigées tangentiellement le long d'une grille. Les polluants sont récupérés dans une fosse située dans la partie interne de l'ouvrage et les "eaux claires" circulent dans la partie extérieure avant d'être relarguées vers le milieu naturel (*Figure 9*).

Les séparateurs CDS sont ceux qui, d'un point de vue technique, se rapprochent le plus de l'ouvrage étudié dans le cadre de cette thèse. La différence se situe dans l'arrivée de l'effluent. Dans le CycloneSep<sup>®</sup>, l'effluent arrive tangentiellement à l'extérieur de la grille et les eaux "déchargées" tournent dans la partie centrale.



*Figure 9. Séparateur CDS (Jago, 2003)*

Type de séparateur	Principe de séparation
StormKing™ FluidSep™	<ul style="list-style-type: none"> <li>• effet vortex</li> </ul>
Downstream Defender®	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cloison siphonide pour retenir les flottants et les hydrocarbures</li> <li>• chambre de sédimentation</li> </ul>
CDS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• séparation tangentielle le long d'une grille</li> <li>• chambre de rétention des flottants et des MES dans la partie interne</li> </ul>

**Tableau 2. Classification des séparateurs hydrodynamiques en fonction de leur principe de séparation**

Si le rôle des séparateurs est le même, leur mode de fonctionnement diffère (*Tableau 2*). Le principe de séparation est donc propre à chaque ouvrage, compliquant ainsi les comparaisons entre les ouvrages. Cependant, un aspect technique permet de les classer : la séparation solide/liquide par une grille. Les séparateurs munis de grille capturent l'ensemble des macro-déchets mais restent cependant contraints à d'éventuels phénomènes de colmatage. Ainsi, pour limiter ces phénomènes, il est important de connaître le comportement hydraulique de l'ouvrage.

## II. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE DU FONCTIONNEMENT DES SEPARATEURS

### 1. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE DES ECOULEMENTS DANS LES OUVRAGES DE SEPARATION PARTICULAIRE

Les mouvements des polluants dans un ouvrage sont régis par l'écoulement. Ainsi, les diverses techniques de séparation dépendront de la forme et du type d'écoulement adopté par l'ouvrage.

#### Séparation par décantation

La séparation solide/liquide par décantation statique n'est pas récente. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les premiers bassins de sédimentation ont vu le jour. Une grande cuve circulaire avec un fond légèrement pentu permettait, grâce à un mécanisme rotatif, de racler et d'entraîner les sédiments vers le centre du bassin (Blazy et al., 1999). D'un point de vue hydraulique, l'écoulement principal dans ces ouvrages est en rotation autour de l'axe central. Cependant, ce type d'ouvrage est siège de nombreuses recirculations verticales (Quarini, 1996). Jayanti & Narayanan (2004) ont montré que la conduite d'entrée et la géométrie du fond pouvaient influencer la forme de ces recirculations. De plus, ils ont observé qu'une fraction importante des particules est entraînée dans ces zones tourbillonnaires.

Les phénomènes de recirculation sont également présents dans les bassins de forme rectangulaire. De plus, de nombreuses études ont montré le comportement asymétrique de l'écoulement, bien que la forme de l'ouvrage soit parfaitement symétrique. Les chercheurs travaillant sur cette thématique ont tenté de classer ces écoulements en fonction de la forme de l'ouvrage en utilisant des rapports entre les dimensions (Dewals et al., 2008 ; Dufresne et al., 2010 ; Kantoush, 2008).

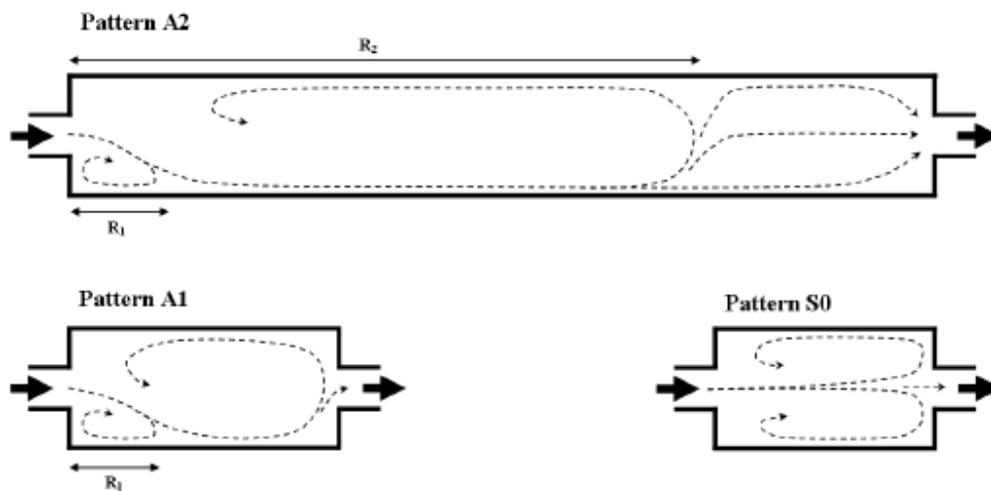


Figure 10. Classification des écoulements dans des bassins rectangulaires selon Dufresne et al. (2009)

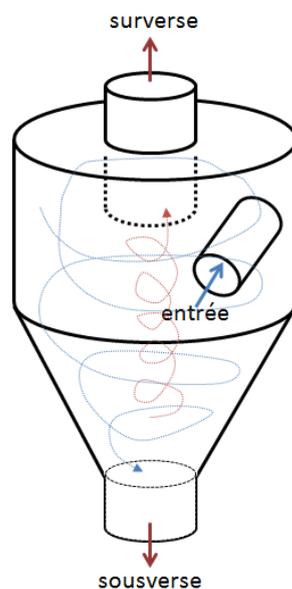
Les recirculations sont sensiblement liées aux zones de dépôts observées expérimentalement (Dufresne, 2008 ; Dufresne et al., 2009 ; Vosswinkel et al., 2012 ; Camnasio et al., 2013). De plus, les études menées par Yan et al. (2011) sur un bassin réel de grande taille ont démontré l'influence de l'hydrodynamique sur les zones préférentielles de dépôts.

Les ouvrages de décantation sont généralement volumineux, dans le but d'augmenter les temps de séjours et favoriser la sédimentation. En plus de ces objectifs, les résultats discutés ci-dessus montrent que les écoulements dans ces ouvrages peuvent présenter de nombreuses recirculations et ceci malgré leur forme symétrique. L'autre information concerne le lien entre les dépôts et ces zones de recirculations. En effet, la connaissance des zones de dépôts est importante, en particulier pour l'exploitant de l'ouvrage. D'autre part, dans l'objectif de modéliser les écoulements et le transport solide dans les ouvrages, la prise en compte de ces phénomènes est importante.

### Séparation par centrifugation

Une autre technique de séparation consiste à utiliser la force centrifuge pour séparer les solides de l'écoulement. Cette technique est utilisée pour les hydrocyclones ou les centrifugeuses. Le principe physique associé à la centrifugation consiste à générer une force, induite par la vitesse de rotation, de manière à écarter les particules.

Globalement, l'écoulement tangential permet de mettre en rotation la colonne d'eau dans la partie cylindrique. Un courant sous forme de spirale descend vers le fond (en bleu sur la *Figure 11*) et permet aux particules lourdes de décanter et d'être récupérées via une sousverse. La spirale ascendante (en rouge) permet quant à elle l'évacuation des eaux les moins chargées via la surverse.

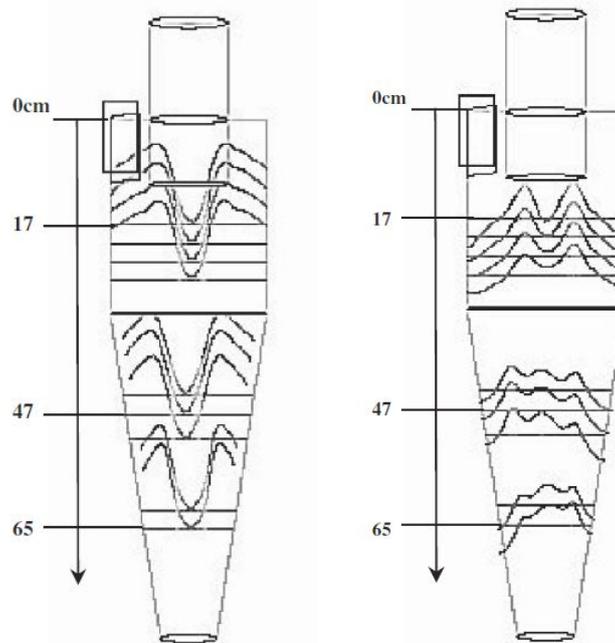


*Figure 11. Schématisation du fonctionnement de l'écoulement dans un hydrocyclone*

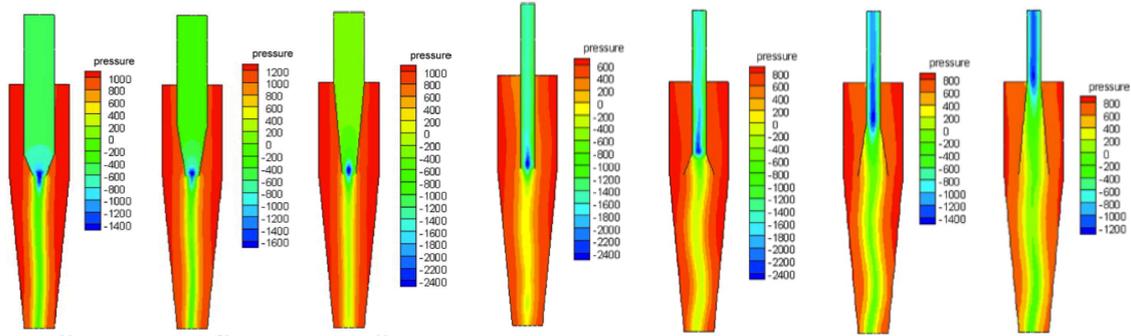
D'un point de vue technique, ces ouvrages ressemblent à l'ouvrage étudié dans le cadre de cette thèse, mais à défaut d'avoir la partie centrale et la grille. Il y a donc un intérêt à visualiser les phénomènes physiques dans un tel ouvrage.

Les champs de vitesse dans un tel système résultent de la forme particulière de l'hydrocyclone. La plupart des études montrent une évolution similaire (Houot & Joussemet, 1996 ; Lee et al., 2006 ; Noode Farahani et al., 2011). Les vitesses tangentielles augmentent lorsqu'on se rapproche vers l'axe central avant de décroître légèrement (*Figure 12*). La valeur des vitesses n'est néanmoins pas citée dans les différentes publications. En revanche, il est intéressant de discuter de l'allure. On remarque que le profil symétrique est constant sur la hauteur. Cependant, les vitesses axiales ont un comportement dissymétrique lorsque l'écoulement passe dans la partie conique (à droite de la *Figure 12*). Par analogie avec notre ouvrage, on peut s'attendre à observer des vitesses importantes à proximité de la grille.

Par ailleurs, l'influence de la géométrie sur l'écoulement a été étudiée par plusieurs auteurs. Lee et al. (2006) ont étudié l'influence de la longueur du cône sur le profil de vitesse. Les auteurs ont conclu que la modification du cône a une influence non négligeable sur le profil de vitesse dans le cône mais également dans la partie cylindrique. D'autres études ont pu démontrer l'influence de la géométrie sur l'écoulement dans les hydrocyclones. Citons par exemple Elsayed & Lacor qui ont testé l'influence de la conduite d'entrée (2011a) et du diamètre de la sousverse (2011b), ou encore Raoufi et al. (2008) qui ont cherché à évaluer le rôle de la forme de l'axe central sur les phénomènes de pression (*Figure 13*).

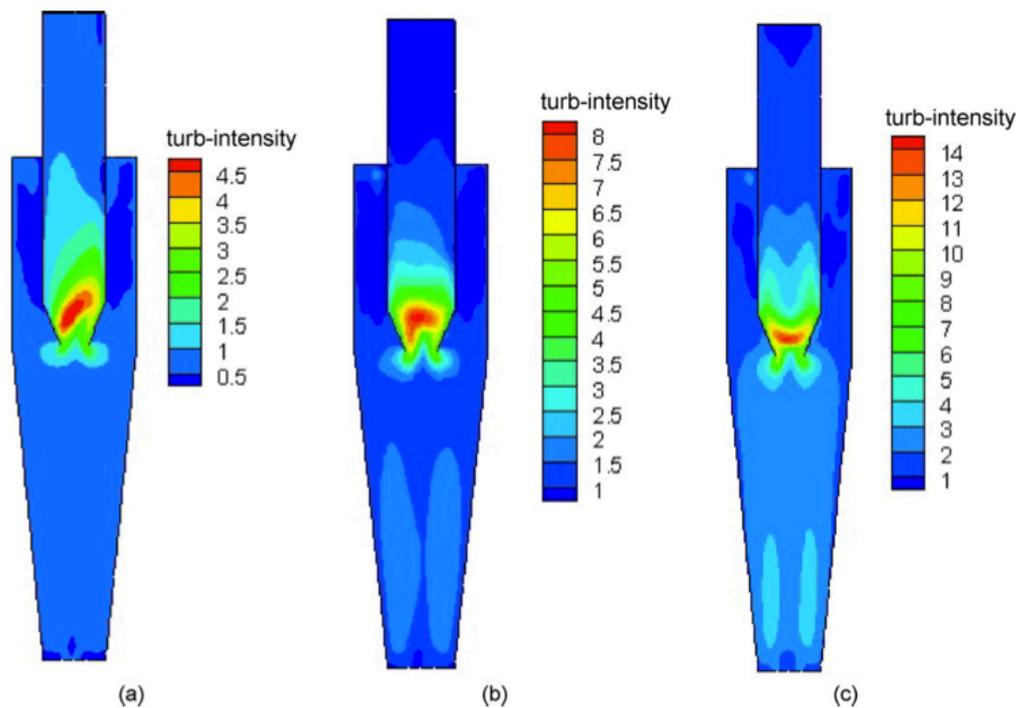


**Figure 12. Vitesses tangentielles (à gauche) et axiales (à droite) obtenues par Lee et al. (2006)**



**Figure 13. Champs de pression pour différentes géométries de l'axe central pour un débit d'entrée de 70 l/min obtenus par Raoufi et al. (2008)**

Les résultats obtenus via la modélisation numérique par Raoufi (2008) ont également permis de mettre en évidence les phénomènes de turbulence dans l'ouvrage. La *Figure 14* montre que l'intensité turbulente est particulièrement importante dans la zone de contraction du passage du fluide par la surverse. D'autre part, ces phénomènes de turbulence sont croissants avec l'augmentation du débit d'entrée dans l'ouvrage. Ces deux remarques laissent supposer qu'une présence de phénomènes turbulents est envisageable dans notre étude. On a donc tout intérêt à prendre en compte ces phénomènes dans notre étude, notamment dans le cadre de la modélisation de l'écoulement.

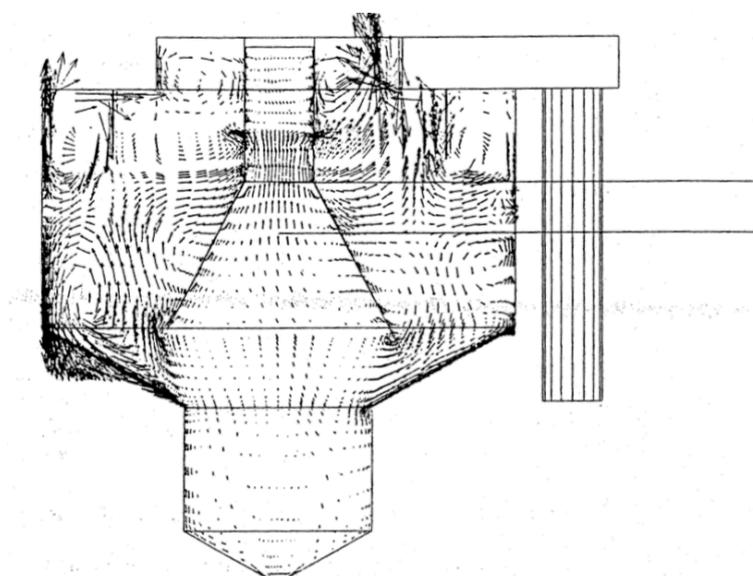


**Figure 14. Intensité turbulente pour différents débits d'entrée obtenus par Raoufi et al. (2008) : (a) 30 l/min (b) 50 l/min et (c) 70 l/min**

## Séparation tangentielle

Contrairement aux bassins de décantation, l'objectif des séparateurs n'est pas d'augmenter le temps de séjour pour favoriser la sédimentation, mais de séparer les particules de l'effluent dans un volume relativement restreint. De ce fait, de nombreux chercheurs se sont inspirés des hydrocyclones.

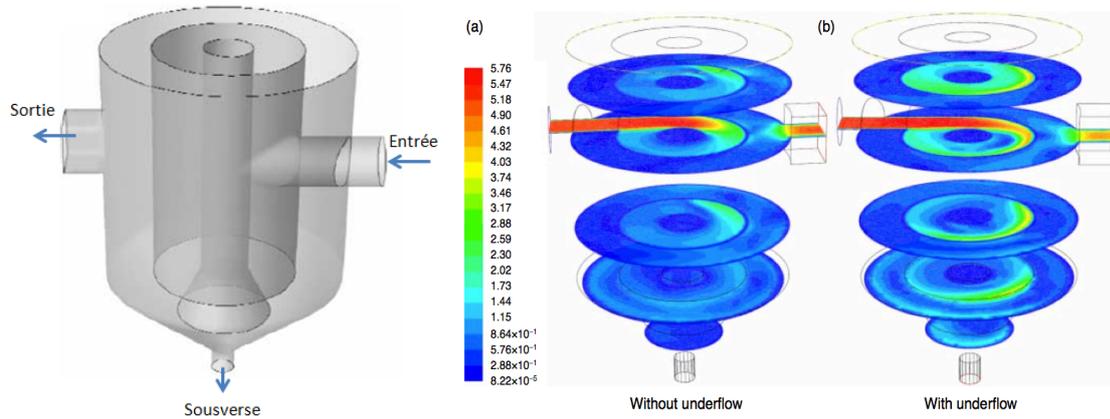
Les expérimentations effectuées par Tyack & Fenner (1999) sur un prototype en laboratoire ont mis en évidence le caractère non-homogène du profil de vitesse. Les mesures de vitesse effectuées à l'aide d'un vélocimètre ADV sur un *Grit King*<sup>®</sup> de 1600 mm de diamètre montrent que plus on s'éloigne du centre, plus les vitesses sont importantes. En fonctionnement nominal ( $Q = 52$  l/s), les vitesses tangentielles dans l'ouvrage varient de - 10 à 100 cm/s et les vitesses verticales de -15 à 65 cm/s. Ces valeurs montrent que la direction principale est tangentielle. Cependant, en raison des fortes vitesses verticales, on peut s'attendre très certainement à une incidence sur l'écoulement. De plus, les simulations numériques réalisées ont mis en avant d'importants courants secondaires (*Figure 15*). Ces courants secondaires, qui représentent la direction secondaire de l'écoulement, mettent en évidence de nombreuses recirculations verticales. Ces recirculations auront notamment des répercussions sur la remise en suspension des particules.



*Figure 15. Vecteurs vitesse dans un séparateur hydrodynamique via une modélisation numérique 3D (coupe verticale) (Tyack & Fenner, 1999)*

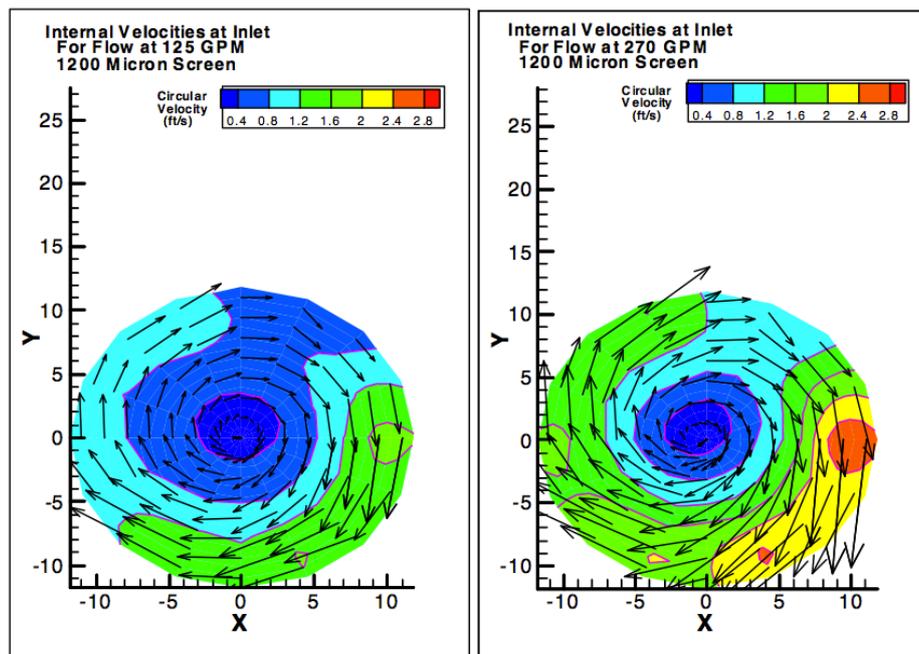
Le séparateur hydrodynamique étudié par Lee et al. (2010) est très proche d'un *Grit King*<sup>®</sup> mais une plaque cylindrique joue le rôle de déflecteur et sépare l'écoulement (*Figure 16*). Les résultats de simulations mettent en avant l'écoulement tangential qui va tourner et descendre contre la paroi centrale. Les vitesses sont plus importantes dans le plan parallèle à la conduite d'entrée (*Figure 16a*) et les vitesses dans la partie extérieure sont très faibles (20 fois plus faible que la vitesse d'entrée).

D'autre part, l'ajout de la sousverse permet de modifier le profil de vitesse. En effet, la *Figure 16b* montre une augmentation d'environ 50 % du champ de vitesse au fond de la partie centrale de l'ouvrage.



*Figure 16. Séparateur hydrodynamique étudié par Lee et al. (2010): géométrie (à gauche) et champs de vitesse sans le fonctionnement de la sousverse (a) et avec le fonctionnement de la sousverse (b)*

Pour les techniques de séparation tangentielle le long d'une grille, les études sur les ouvrages de type *CDS (Continuous Deflective Separation)* montrent un comportement proche de celui observé par Lee et al. (2010).



*Figure 17. Champs de vitesse dans la partie centrale d'un CDS (Schwarz & Wells, 1999)*

Schwarz & Wells (1999) ont mesuré les profils de vitesse horizontaux dans ce type d'ouvrage (*Figure 17*). Seules les mesures à l'intérieur de la grille ont été étudiées pour des débits de 10 l/s et 20 l/s. Les 24 points de mesures ont permis de reproduire les champs de vitesse pour ces deux débits pour une grille identique (mailles de 1200  $\mu\text{m}$ ). On observe une répartition non-homogène avec des vitesses plus élevées sur les parois extérieures et proches de la conduite d'entrée. Pour 10 l/s, les vitesses le long de la grille varient de 0,4 m/s, qui correspond avec l'entrée du fluide dans l'ouvrage, à 0,2 m/s, qui correspond à une zone où le fluide a déjà effectué un tour. L'augmentation du débit ne fait qu'amplifier la valeur des vitesses dans l'ouvrage et la différence entre ces zones. Pour 20 l/s, la vitesse en entrée est de 0,8 m/s et au bout d'un tour, elle atteint 0,3 m/s.

## **Bilan**

Les études décrites précédemment ont montré la diversité des ouvrages de séparation existants, tant sur la forme, que sur le mode de fonctionnement. D'autre part, les résultats ont montré que la géométrie de l'ouvrage jouait un rôle important sur la forme de l'écoulement. Par analogie avec le fonctionnement de notre ouvrage, on peut s'attendre à obtenir un champ de vitesse assez proche de celui observé dans un hydrocyclone. Cependant, l'écoulement dans un séparateur hydrodynamique, utilisant un déflecteur conique dans la partie centrale, induit un comportement opposé. Dans ces ouvrages, les vitesses sont importantes en s'éloignant du centre. Par ailleurs, les mesures effectuées sur des séparateurs munis d'une grille ont démontré une distribution non homogène des vitesses le long de la grille. Toutes ces remarques montrent que l'écoulement est difficilement prévisible. La caractérisation de l'écoulement sur un ouvrage pilote est donc nécessaire.

## **2. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE DU TRANSPORT SOLIDE DANS LES OUVRAGES**

L'objectif principal des ouvrages de séparation particulaire est d'intercepter les polluants et de limiter leurs rejets vers les milieux récepteurs en période de pluie. L'ouvrage étudié dans la thèse est destiné à capturer les macro-déchets. De ce fait, une description de ces polluants est réalisée dans cette partie. Dans l'optique de capturer des sédiments, nous nous intéresserons également aux caractéristiques des particules qui transitent dans les réseaux d'assainissement. Dans une seconde partie, nous reviendrons sur les études effectuées qui évoquent l'efficacité des ouvrages de séparation particulaire.

### **Les macro-déchets**

En période de temps sec, une grande diversité de polluants est émise par les activités anthropiques et se dépose sur les surfaces urbaines. Le terme "macro-déchets" est usuellement utilisé pour qualifier ce type de polluants. On regroupe sous cette appellation différents polluants comme les sacs ou les bouteilles en plastiques, les canettes en métal ou verre, les cartons ou encore les papiers. Avec la pluie, l'ensemble de ces polluants est transporté par ruissellement vers les avaloirs avant de rejoindre le

réseau d'assainissement et d'être déversé dans les milieux naturels. On retrouve également dans les milieux naturels un certain nombre de déchets d'origine domestiques. Les lingettes hygiéniques ou les cotons-tiges sont retrouvés en grande quantité et proviennent de surverses de déversoirs d'orage. Dans le cadre de la convention OSPAR (2013), une quantité importante de déchets a été recensée sur 100 mètres de berges le long de la Seine. L'ONG Mal de Seine a, par exemple, récupéré 17 000 objets parmi lesquels 2981 cotons-tiges, 899 bâtons de sucette, 71 seringues, etc. (Boitelle, 2013).

Les caractéristiques physiques de ces polluants sont très diversifiées. Les tailles et les formes sont très variables. Notons tout de même qu'on regroupe sous le terme "macro-déchets" les polluants supérieurs à 2 cm. D'autre part, les matériaux constituant ces polluants sont également très diversifiés. Par exemple, la faible masse volumique d'un sac en plastique permettra à ce dernier de flotter. En revanche, une canette en verre va adopter un autre comportement. La solidité de ce type de déchet va lui permettre, par exemple, de se remplir partiellement d'eau et de couler.

Ainsi, cette variabilité des caractéristiques physiques est extrêmement problématique dans la conception des ouvrages. Ils doivent être capables de capturer aussi bien les flottants que les déchets solides de fortes densités. D'autre part, certains déchets comme les sacs plastiques ou les lingettes sont plus propices au colmatage de grilles. Un intérêt particulier doit donc être fait pour ce type de polluants.

D'autre part, on estime aujourd'hui que 80 % des macro-déchets retrouvés en mer proviennent des terres (GESAMP, 1991). Ce chiffre justifie donc totalement le fait de chercher à installer des ouvrages de capture de macro-déchets dans les réseaux d'assainissement.

### **Caractéristiques des particules en assainissement**

En plus des macro-déchets, on retrouve une forme de pollution étudiée depuis plusieurs décennies ; la pollution particulaire. L'étude de la pollution particulaire se justifie notamment par le fait que de nombreux polluants sont fixés sur la fraction particulaire (Chebbo, 1992 ; Gromaire, 1998 ; Ashley et al., 2004 ; Gromaire, 2012). Les résultats d'expériences de Chebbo & Bachoc (1993) permettent d'estimer à environ 80% la part des polluants fixée par les particules. Les récentes recherches sur cette thématique ont démontré que les effluents de temps de pluie présentent des fractions particulaires plus importantes que celles observées en temps sec. Si la proportion médiane de DCO, DBO<sub>5</sub> et COT avoisine les 80%, 95% des éléments métalliques et des hydrocarbures sont fixés sur la fraction particulaire (Gromaire, 2012).

Chocat et al. (2007) ont classé les concentrations moyennes événementielles des Rejets Urbains par Temps de Pluie (RUTP) en fonction du type de réseau (*Tableau 3*). Il en ressort que les concentrations des particules solides en suspension sont importantes, aussi bien en réseau unitaire qu'en réseau

séparatif. Ce constat justifie donc l'intérêt que l'on porte à vouloir installer des ouvrages permettant d'éviter les rejets des matières en suspensions (MES) dans les milieux récepteurs en période de pluie.

	<b>Pluviaux séparatifs</b>	<b>Pluviaux unitaires</b>
<i>MES (mg/L)</i>	225,5	425
<i>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</i>	17,5	90
<i>DCO (mg/L)</i>	85	380
<i>N total (mg/L)</i>	3,2	8,3
<i>P total (mg/L)</i>	0,34	10

**Tableau 3. Concentrations moyennes événementielles des RUTP (Chocat et al., 2007)**

De plus, la part importante de polluants présente dans les eaux de ruissellement incite également les travaux de recherche à s'intéresser aux principales sources. Des études ont permis d'établir que les surfaces présentant les plus fortes concentrations en MES sont les chaussées (Hannouche, 2012 ; Lamprea, 2009). Gromaire (1998) estime que 40 à 70 % des MES présentes dans les réseaux proviendraient de la voirie. Les eaux provenant des parkings présente également une concentration importante en MES. Ces résultats permettent ainsi de mettre en avant la pollution des eaux pluviales et la nécessité de traiter ces eaux avant le rejet vers le milieu naturel.

Concernant leurs caractéristiques, plusieurs études, dont celle réalisée par Chebbo & Bachoc (1993), ont permis d'établir des constats sur les polluants particuliers en assainissement. Les expérimentations menées ont démontré l'évolution similaire des caractéristiques granulométriques entre un réseau unitaire et un réseau séparatif. Concernant la taille moyenne, le diamètre médian  $d_{50}$  des particules se situe entre 30 et 40  $\mu\text{m}$ . De plus, les auteurs ont observé qu'environ 70 à 80% des particules avaient un diamètre inférieur à 100  $\mu\text{m}$  (Chocat et al., 2007). Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous montrent également que l'on retrouve de plus grosses particules en réseau séparatif (Tableau 4).

	<b>D<sub>10</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>D<sub>50</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>D<sub>90</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>d&lt;100 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>Réseau unitaire</b>	3,5	34,3	332	75%
<b>Réseau séparatif</b>	4,4	35,1	611	81%

**Tableau 4. Valeurs  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  et du pourcentage de particules solides inférieures à 100  $\mu\text{m}$  pour différents types de RUTP (Chebbo, 1992)**

En assainissement, la masse volumique des particules est variable en fonction du type de réseaux. En réseau unitaire, la masse volumique moyenne des particules varie entre 1700 et 2200 kg/m<sup>3</sup>. En réseau séparatif pluvial, la masse volumique se situe plutôt entre 2200 et 2400 kg/m<sup>3</sup> (Chocat et al., 2007).

La vitesse de chute est une caractéristique qui permet de juger la décantabilité des particules. Les recherches menées jusqu'à présent ont montré une très grande dispersion des vitesses de chute des particules. D'après Ashley et al. (2004), les vitesses de chute médianes sont comprises entre 4 et 11 m/h. Pour Chocat et al. (2007), ces vitesses se situent entre 0,2 et 11 m/h pour les réseaux unitaires et 0,6 à 9 m/h pour les réseaux séparatifs. Les études plus récentes et synthétisées par Gromaire (2012) ont montré une variabilité de 0,1 à 18 m/h.

L'ensemble des caractéristiques granulométriques établi par les différents chercheurs vont nous permettre, dans le cadre de cette thèse, d'utiliser ces valeurs pour l'étude expérimentale ainsi que la modélisation numérique.

### **Efficacité des ouvrages de décantation en assainissement**

L'efficacité d'un ouvrage à retenir des particules est généralement déterminée à partir d'un bilan entrée/sortie. La performance de ces ouvrages dépend de nombreuses variables : type d'ouvrage, forme, nature de l'écoulement, caractéristiques des polluants, ...

Pour les bassins de décantation, les faibles vitesses et le grand volume d'eau permettent d'obtenir un rendement très important. Citons par exemple les travaux de Nascimento (1999) dont le bassin d'Ulis Sud permet d'abattre 90 % des particules. Deux campagnes de mesures dans un bassin à Rosheim (Alsace) ont permis de montrer que l'efficacité de rétention pouvait être variable (Leclaire, 1997 cité par Dufresne, 2008). L'efficacité de l'ouvrage au mois de juin était de 84 % et de 72 % en juillet. D'autre part, les mesures effectuées de 2004 à 2010 sur le bassin Django Reinhardt à Lyon ont montré que les rendements pouvaient varier de 33 à 75 % (Gonzalez-Marchand, 2012). Ces résultats montrent donc la difficulté à prévoir l'efficacité des ouvrages et que les rendements dépendent de la géométrie de l'ouvrage, des conditions hydrauliques et des événements pluvieux.

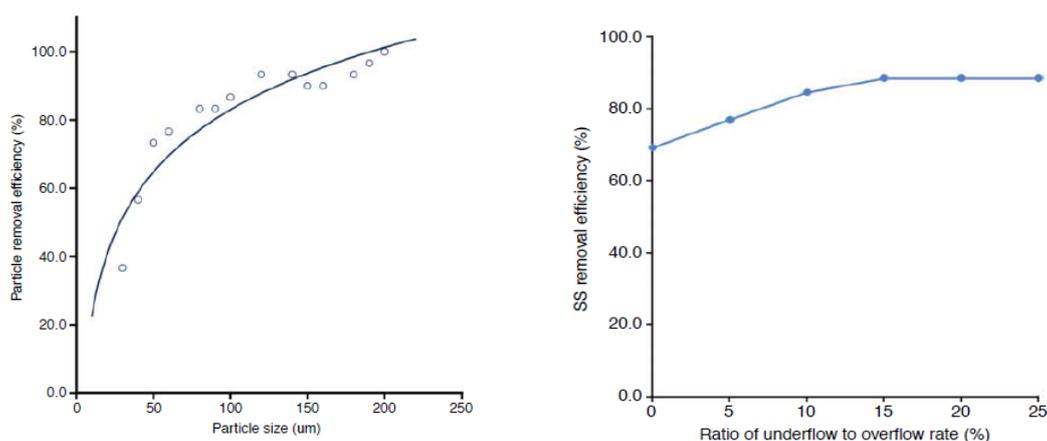
Parmi les ouvrages spécifiques, on peut citer les décanteurs lamellaires. Ces ouvrages sont utilisés pour abattre la pollution particulaire par le biais de lamelles inclinées. Selon Chocat et al. (2007), ces ouvrages peuvent obtenir des rendements supérieurs à 85%. Fuchs et al. (2013) ont rapporté que les rendements moyens de trois décanteurs lamellaires sur une période de quatre ans étaient de 50 à 70%. En France, une étude réalisée par Aires (1998), et citée par Hache (2000), a permis d'étudier l'abattement de MES dans des décanteurs lamellaires à contre-courant situés dans des lieux différents. En moyenne, ces ouvrages permettent de récupérer 20 à 85 % des MES. Là encore, les rendements sont très variables.

D'autre part, les contraintes liées à l'exploitation et à la maintenance des ouvrages de décantation sont très importantes. Il est difficile de déterminer les zones de dépôts ou encore le taux d'encrassement des lames. De plus, la vidange et le nettoyage des ouvrages sont contraignantes (difficulté d'accès, temps et fréquence de nettoyage variables,...). Il sera donc intéressant dans ce contexte de déterminer les contraintes liées à l'exploitation de l'ouvrage étudié dans la thèse et l'efficacité en terme de rétention de particules.

### **Efficacité des séparateurs hydrodynamiques en assainissement**

Concernant les séparateurs hydrodynamiques, si quelques études relatent d'expérimentations de terrain (Faram, 2007 ; Birch & Matthai, 2009), on retrouve la plupart du temps des études en laboratoire effectuées sur des modèles réduits. Les études en laboratoire ont l'avantage de valider les données via des tests de répétabilité.

Lee et al. (2010) ont utilisé des particules allant de 100  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$  et d'une masse volumique de 2000  $\text{kg}/\text{m}^3$  pour étudier l'efficacité de leur séparateur. Les expérimentations réalisées ont montré que l'efficacité diminue si la taille des particules diminue (*Figure 18*). D'autre part, le fait d'ajouter un système de sousverse (installation de type "réseau unitaire") augmente de 2 à 5 % l'efficacité du système.



**Figure 18. Efficacité du séparateur en fonction de la taille des particules (à gauche) et efficacité en fonction du ratio entre la surverse et la sousverse (à droite) pour  $800 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jour}$**

Un ouvrage du même type a été testé par Kwon et al. (2012). Les expérimentations menées sur un modèle physique de 480 mm de haut et 300 mm de diamètre ont permis de comparer l'efficacité d'un déflecteur en forme de spire par rapport à une configuration brute (*Figure 19*). L'objectif de l'ouvrage étant ici de retenir des fines particules, les auteurs ont cherché à augmenter le rendement en optimisant l'écoulement à l'intérieur. L'aménagement du déflecteur a permis d'augmenter d'environ 10 % l'efficacité de rétention des MES, en augmentant notamment la rétention des particules très fines

(inférieures à 75  $\mu\text{m}$ ). L'idée d'installer des déflecteurs est intéressante pour nos travaux, dans l'objectif à long terme d'optimiser le séparateur hydrodynamique.

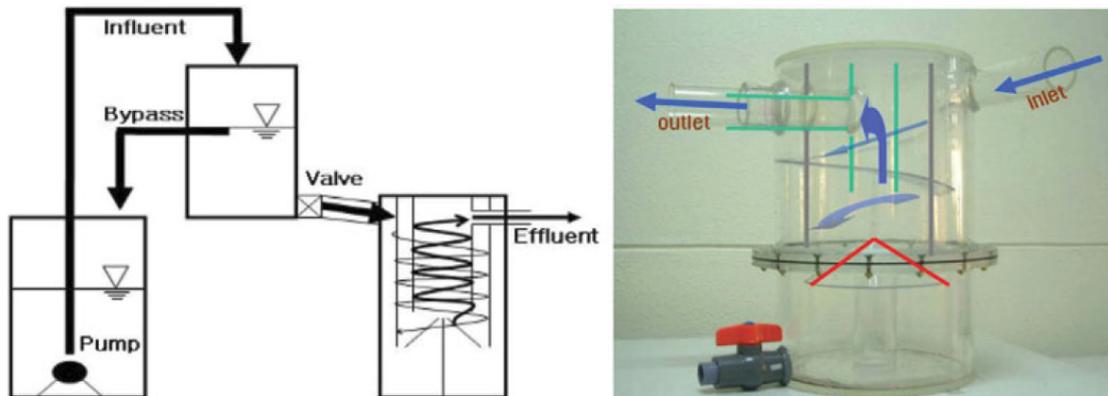


Figure 19. Pilote expérimental utilisé par Kwon et al. (2012)

Parmi les ouvrages utilisant des grilles pour séparer les polluants de l'effluent, on peut citer les travaux de Schwarz & Wells (1999) qui ont testé différents types de sables sur un séparateur CDS. Il ressort des expérimentations que plus le débit est grand, plus l'ouvrage permet de retenir les petites particules. En d'autres termes, l'augmentation du champ de vitesses dans l'ouvrage permet d'augmenter la performance de l'ouvrage. D'autre part, une étude comparative entre deux types de grille (mailles de 1,2 ou 2,4 mm) a été réalisée afin d'observer une éventuelle influence de la taille des ouvertures sur l'efficacité globale de l'ouvrage. Les résultats présentés sur la Figure 20 démontrent l'influence de la taille des ouvertures sur la performance de l'ouvrage. L'utilisation d'ouvertures deux fois plus petites permet de capturer environ 5 % de particules fines en plus (entre 75 et 100  $\mu\text{m}$ ) et environ 10 % de particules avec un diamètre entre 425 et 600  $\mu\text{m}$ . Ainsi, deux résultats majeurs ressortent de cette étude. D'une part, ils prouvent que la grille permet de retenir des particules inférieures à la taille des ouvertures, et d'autre part, cela montre que la forme de la grille a un réel impact sur l'efficacité du système. On regrette cependant le manque d'informations sur la masse volumique des particules utilisées.

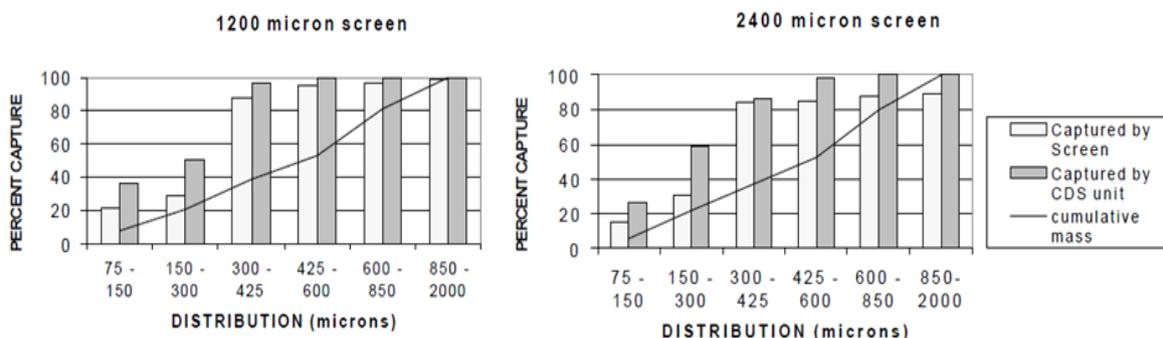


Figure 20. Efficacité de l'ouvrage étudié par Schwarz & Wells (1999) en fonction de la taille des ouvertures de la grille

Comme dans les travaux de Schwarz & Wells (1999), d'autres chercheurs ont constaté que les séparateurs utilisant des grilles pouvaient retenir des particules fines. Les expériences de Wong (1996) ont montré que la grille (maille de 3,8 mm x 10 mm) pouvait retenir des sables inférieurs à la taille des mailles. Pathapati et Sansalone (2009) ont également observé ce phénomène sur un séparateur *CDS* avec une grille disposant d'ouvertures de 2,4 mm. Les particules utilisées pour les expériences possèdent des diamètres compris entre 25  $\mu\text{m}$  et 450  $\mu\text{m}$  et une masse volumique de 2650  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Ils sont donc très représentatifs de la réalité étant donné leurs caractéristiques très proches des particules retrouvées en réseaux d'assainissement.

Parmi les études de terrain, Birch & Matthai (2009) ont suivi le rendement d'un séparateur *CDS* dont l'objectif est de traiter les eaux pluviales d'un bassin versant très urbanisé. Les campagnes expérimentales ont montré que l'ouvrage ne permettait de retenir qu'une partie des matières en suspension. En revanche, l'ouvrage est très intéressant pour la capture des macro-déchets.

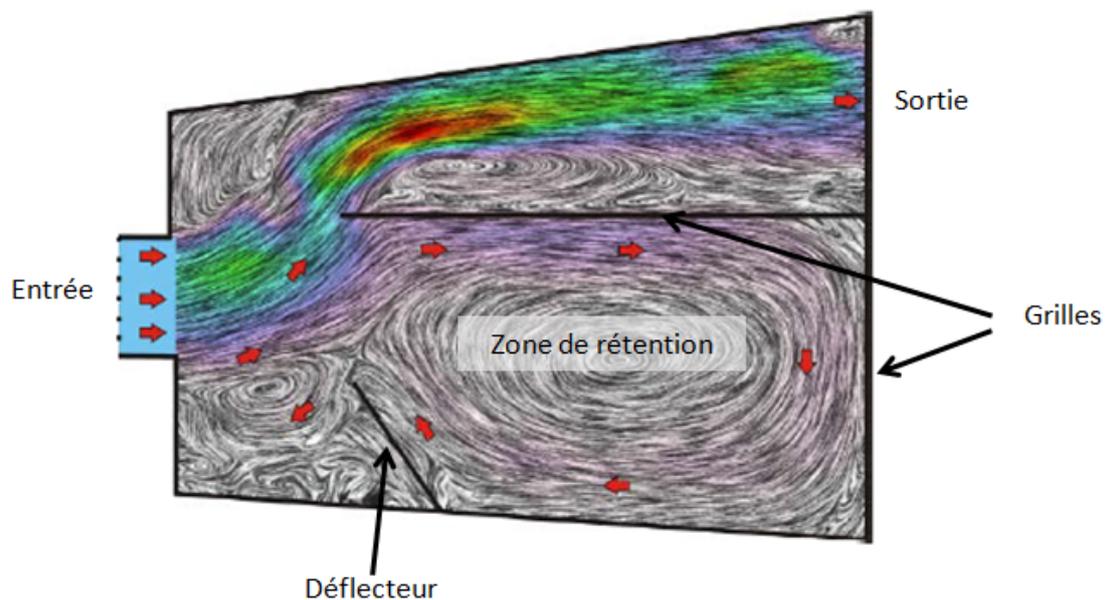
La capacité des séparateurs hydrodynamiques à retenir des particules ressort très souvent. Cependant, face à des ouvrages de décantation, les diamètres des particules capturées par des séparateurs sont généralement supérieurs à 75  $\mu\text{m}$ . Ces données seront donc à prendre en considération pour nos essais de transport solide. D'autre part, nous avons constaté un manque de données concernant les phénomènes de colmatage des grilles au sein des séparateurs. En effet, à notre connaissance, aucun article scientifique ne traite du sujet. Nous allons dans cette étude chercher à combler ces lacunes.

### **Efficacité des ouvrages pour la rétention des macro-déchets**

Pour retenir les macro-déchets, les techniques de dégrillage sont usuellement utilisées (Bourrier et al., 2010 ; Hache, 2000). L'efficacité de ce type d'ouvrage dépendra du fonctionnement hydraulique ainsi que des caractéristiques des grilles (forme de la grille, écartement des barreaux, positionnement,...). L'utilisation de grilles statiques est très contraignante pour la maintenance car le colmatage se met très rapidement en place. De plus, l'ajout de dispositif à transfert de déchets (râteau, pelles, brosses,...) nécessitent également une maintenance importante (vérification des éléments mécaniques) (Bourrier et al., 2010).

Pour capturer ces déchets, l'utilisation des séparateurs hydrodynamiques est donc une alternative. Le développement des techniques de séparation tangentielle permettent aujourd'hui d'avoir des dispositifs avec des grilles tout en limitant les phénomènes de colmatage (Wong, 1996 ; Andoh & Saul, 2003 ; Pathapati & Sansalone, 2009). En plus, nous avons vu dans le paragraphe précédent la capacité de ce type d'ouvrage à retenir des particules. D'autre part, certains auteurs vantent les mérites de ces ouvrages pour leur facilité d'exploitation et de maintenance par rapport à des ouvrages de décantation. Une instrumentation permettant de mesurer la quantité de polluants capturés et l'intervention de camions hydrocureurs sont suffisants pour vidanger l'ouvrage (USEPA, 1999).

Face à la problématique liée aux macro-déchets, Madhani et al. (2009) ont mis au point un nouveau système de dégrilleur (*Figure 21*). Ce système consiste à aménager un bassin rectangulaire à l'aide de grilles et de déflecteurs, et à jouer sur les recirculations pour permettre la rétention des macro-déchets. Une ouverture sur le côté permet d'évacuer les débits importants et assure la continuité hydraulique en cas de colmatage des grilles. Si cette technique est intéressante pour limiter le colmatage, notons tout de même qu'un ouvrage de ce type nécessite des contraintes particulières au niveau de la taille et des conditions hydrauliques. En effet, le dimensionnement de ce type d'ouvrage doit s'avérer compliqué pour arriver à reproduire l'écoulement recherché (zone de recirculation devant la grille, orientation du flux pour des débits importants,...). Ces travaux peuvent toutefois être exploités dans cette thèse dans un contexte d'optimisation de l'ouvrage en jouant sur les zones de recirculation. Ces aménagements permettraient par exemple d'éviter le passage des déchets proche de la grille ou encore de favoriser des zones de stockage.



*Figure 21. Ouvrage pour la capture des macro-déchets étudié par Madhani et al. (2011)*

Un autre ouvrage de type bassin a été mis au point par Ab Ghani et al. (2011). Le blocage des déchets s'effectue par une grille frontale ainsi qu'avec deux grilles inclinées sur les cotés (*Figure 22*). Les expérimentations en laboratoire ont démontré le bon fonctionnement hydraulique de l'ouvrage ainsi que sa performance à retenir des déchets grossiers (plus de 82 % de macro-déchets sont retenus). De plus, en fonction des conditions hydrauliques, l'ouvrage permet de retenir entre 60 et 70 % des sédiments.

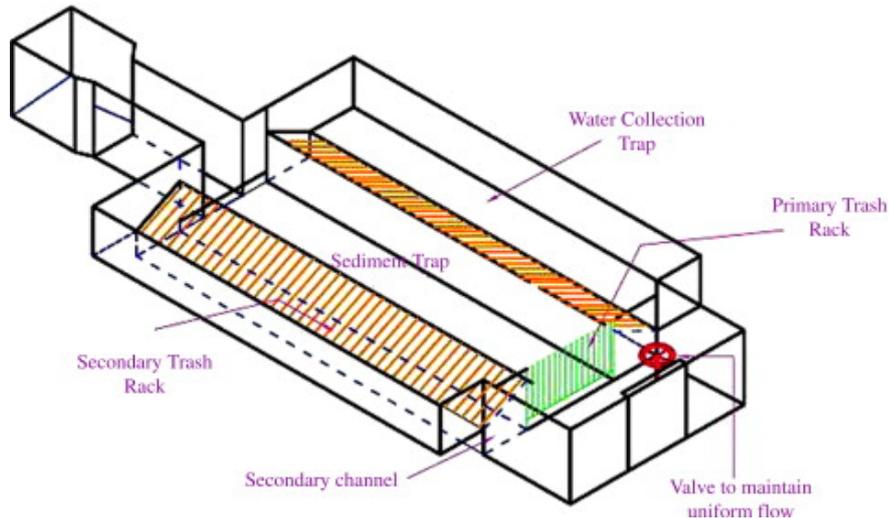


Figure 22. Ouvrage pour la capture des macro-déchets étudié par Ab Ghani et al. (2011)

### Bilan

Cette partie sur le transport solide a permis de mettre en évidence l'efficacité des ouvrages de séparation particulière en assainissement. Les ouvrages de décantation comme les bassins ou les décanteurs lamellaires sont les plus performants pour retenir les polluants particuliers. En revanche, l'exploitation et la maintenance de ce type d'ouvrage sont très contraignantes. Pour protéger les milieux récepteurs des macro-déchets, les séparateurs hydrodynamiques sont très certainement plus adaptés. Le procédé est plus économique face aux objectifs recherchés et l'exploitation beaucoup moins contraignante. Plusieurs chercheurs vantent les mérites des techniques de séparation tangentielle. Les phénomènes de colmatage sont limités par rapport à des dégrilleurs classiques, minimisant ainsi les fréquences de nettoyage.

Les études en laboratoire et les observations *in situ* ont montré que les séparateurs hydrodynamiques permettaient également de retenir de fines particules. Les particules retenues sont généralement supérieures au diamètre médian des particules retrouvées en réseau d'assainissement ( $35 \mu\text{m}$ ) mais restent suffisamment petites (environ  $100 \mu\text{m}$ ) pour explorer les capacités de l'ouvrage à retenir de fines particules. Les explications concernant l'efficacité des techniques de séparation tangentielle à retenir des particules inférieures à la taille des ouvertures n'ont jamais été justifiées. De ce fait, cette piste mérite d'être explorée dans cette thèse.

### III. DESCRIPTION DES ECOULEMENTS ET DU TRANSPORT SOLIDE A TRAVERS UNE GRILLE

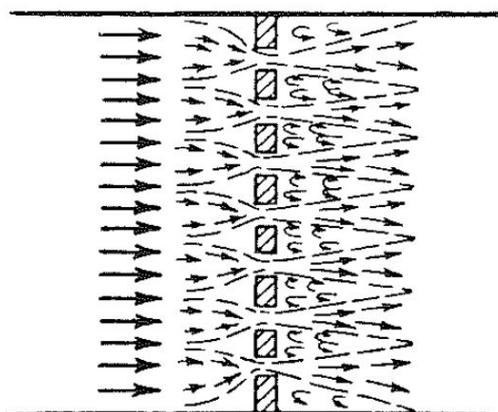
L'utilisation de grilles est très présente en génie hydraulique (protection des centrales hydroélectriques, dégrilleurs,...). En assainissement, leurs aménagements sont généralement utilisés pour bloquer les déchets de grandes tailles. L'installation d'une grille au droit d'un ouvrage va inévitablement modifier le comportement de l'écoulement. Les impacts d'un tel aménagement peuvent se voir à plusieurs échelles. Les pertes de charge provoquées par la grille auront une répercussion à l'échelle globale. Plus localement, notamment à proximité immédiate de la grille, une instabilité des phénomènes physiques peut apparaître (gradients de vitesse ou de pression importants, phénomène de turbulence,...). Dans l'objectif de mieux comprendre les mécanismes physiques provoqué par la présence des grilles au sein d'un écoulement, on se propose dans cette partie de mettre en avant les travaux antérieurs réalisés sur cette thématique et d'en dégager les points importants pour notre étude.

#### 1. COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE GLOBAL A PROXIMITE D'UNE GRILLE

##### **Perturbation du champ de vitesse**

Les propriétés physiques comme le champ de vitesse, le champ de pression, les pertes de charge ou la turbulence vont être modifiées à proximité d'une grille.

Dans le cas d'un écoulement en charge, lors de son passage par l'orifice, la veine fluide va se contracter (*Figure 23*). Hydrauliquement, ce phénomène se traduit par un gain de vitesse. A l'aval de la grille, les vitesses diminuent avant de retrouver un régime établi. Baines & Peterson (1951) estiment que ce régime à l'aval est atteint pour une distance équivalente de 5 à 10 fois le diamètre de la maille de la grille (pour un écoulement frontal).

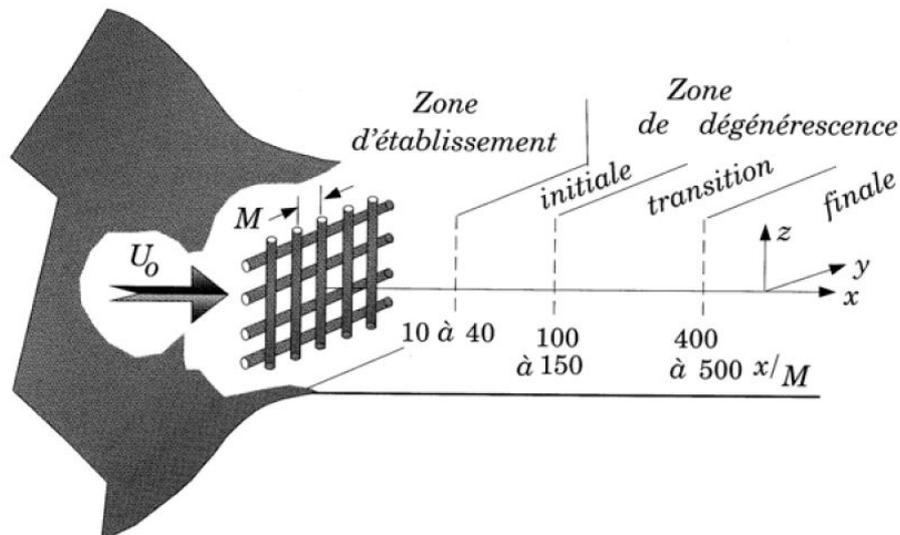


*Figure 23. Schéma du passage de l'écoulement à travers une grille frontale (Idel'Chik, 1986)*

## Turbulence

Le phénomène physique le plus étudié concernant les grilles est le phénomène de turbulence. L'utilisation d'une grille peut avoir deux effets sur la turbulence : en générer ou en dissiper. Pour générer de la turbulence, Laws & Livesey (1978) ont estimé qu'il fallait disposer d'une forte intensité turbulente à l'amont (supérieure à 10%), d'une grille avec des grosses mailles et d'un nombre de Reynolds élevé. La condition pour obtenir un régime d'établissement rapide à l'aval est d'utiliser une grille avec des petits orifices et un faible Reynolds.

Chassaing (2000) a illustré les phénomènes à l'aval d'une grille frontale en tenant compte de la taille des mailles. La zone de dégénérescence est atteinte à partir de 10 à 40 fois le diamètre des mailles (*Figure 24*).



*Figure 24. Configuration expérimentale de turbulence de grille (Chassaing, 2000)*

## Perte de charge

La notion d'énergie est également un aspect important à prendre en compte lors d'un écoulement à travers les grilles. Pour schématiser le phénomène, on peut faire l'analogie avec une succession de deux singularités : une première perte énergétique liée à la contraction puis une seconde avec un élargissement brusque. Ainsi, le coefficient de perte de charge dépend de la géométrie de l'orifice et donc de la grille. Idel'cik (1986) a étudié l'écoulement à travers les obstacles uniformément repartis dans une section. Ces résultats ont permis d'établir des diagrammes propres à chaque configuration en tenant compte du régime et des rapports entre les dimensions (largeur/diamètre).

Ces résultats montrent donc que la forme de la grille, et notamment des ouvertures, joue un rôle important sur les phénomènes physiques à proximité de la grille. De plus, ces phénomènes engendrent des mécanismes de pertes de charge visibles à l'échelle globale.

## 2. INFLUENCE DE LA GEOMETRIE SUR L'ÉCOULEMENT

Plusieurs travaux font références à l'influence de la géométrie sur l'écoulement.

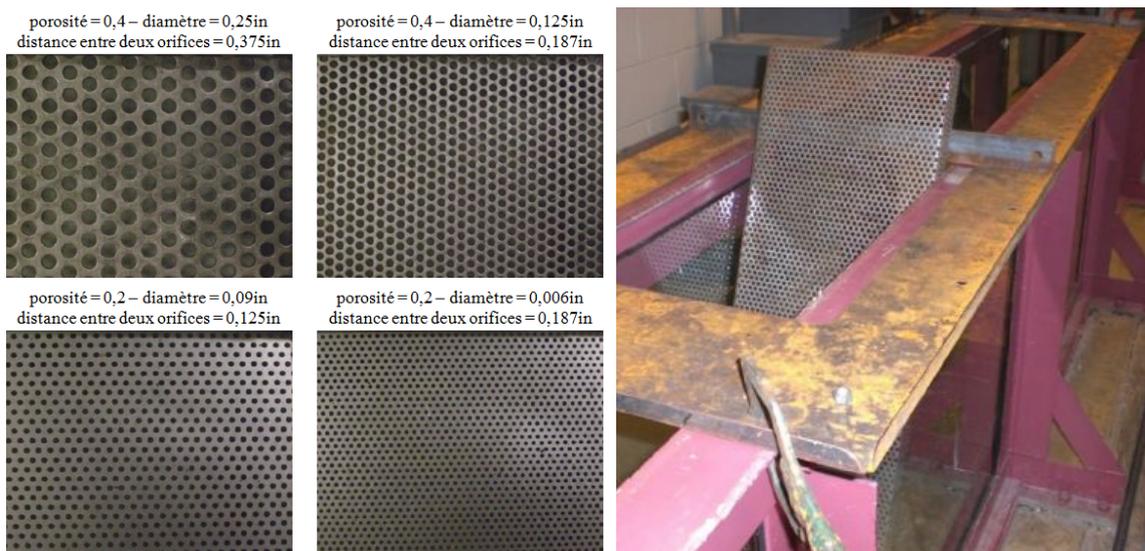
### Influence de la porosité des grilles

Santiago (2007) a étudié les mécanismes de perte de charge et les facteurs influents lors du passage d'un écoulement à travers une grille et notamment l'influence de la porosité de la grille. Cette porosité, définie par l'équation (1), indique notamment la surface de passage disponible pour l'écoulement.

$$\Phi = \frac{S_{vide}}{S_{totale}} \quad (1)$$

avec  $S_{vide}$  la surface de vide des ouvertures et  $S_{totale}$ , la surface de la grille plus la surface de vide.

Un canal d'hydraulique à surface libre (à droite dans la *Figure 25*), d'environ 8 m de long par 0,3 m de large sur 0,9 m de profondeur, a permis de tester quatre grilles différentes (à gauche dans la *Figure 25*).



*Figure 25. Grilles testées (à gauche) et dispositif expérimental (à droite) utilisé par Santiago (Santiago, 2007)*

Les résultats de ces expériences ont permis de montrer l'impact de la porosité des grilles sur les pertes de charges : l'utilisation d'une grille à faible porosité augmente considérablement les pertes de charge.

### **Influence de l'inclinaison de la grille avec l'écoulement**

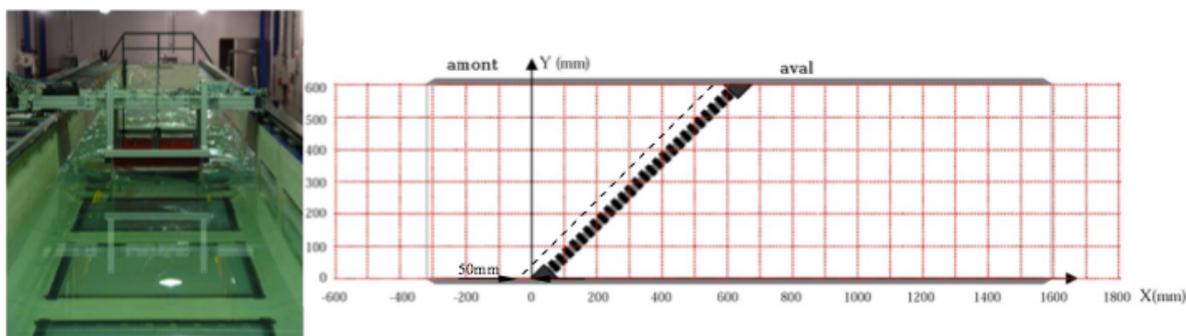
Le dispositif expérimental de Santiago (2007) a également permis de tester l'influence de l'inclinaison de la grille (90, 75, 68 et 59°) pour 12 débits différents (de 0,22 à 4,66 l/s). Ces résultats ont démontré que la perte de charge diminue lorsque l'angle d'inclinaison diminue. Par conséquent, en plus de la géométrie, l'angle d'inclinaison d'une grille par rapport à l'écoulement principal permet de modifier les pertes de charge.

La recherche d'un modèle pour prédire l'inclinaison optimale dans le but d'obtenir le moins de perte de charge possible a été effectuée par Yeh & Shrestha (1989). Si le modèle théorique prédit une inclinaison de 80°, les essais expérimentaux ont quant à eux défini un angle de 60°.

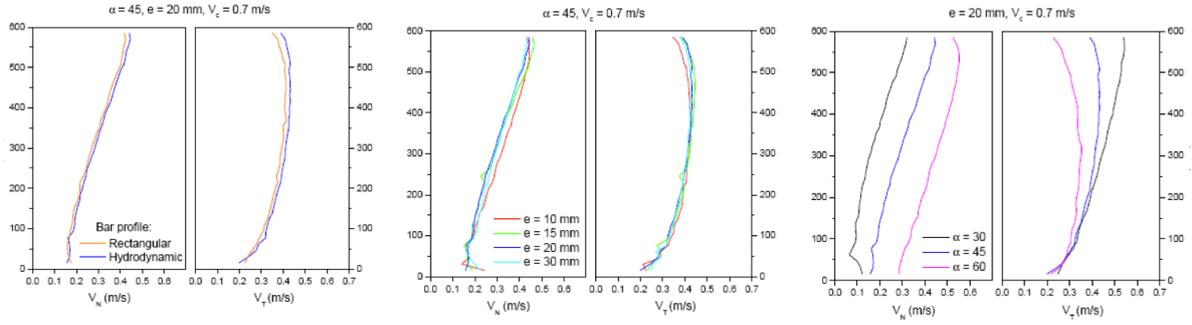
Par rapport à l'ouvrage étudié dans la thèse, ces résultats sont intéressants étant donné la forme de l'écoulement avec la grille. La séparation étant tangentielle et non directe, nous pourrions démontrer l'impact de cette technique sur les pertes de charge.

### **Influence de la forme des barreaux**

La taille et la forme des barreaux métalliques composant les grilles sont aussi des éléments essentiels pouvant modifier les phénomènes à proximité de la grille. Dans le cas des grilles ichtyocompatibles (grilles utilisées dans les écoulements environnementaux pour protéger les animaux marins), l'inclinaison et la forme des barreaux jouent un rôle important sur l'hydrodynamique. Chatellier (2010) a étudié leur influence sur le profil de vitesse à l'aide d'un pilote expérimental à l'échelle 1/2 et une grille à l'échelle 1 (*Figure 26*).



Si le profil du barreau et l'entrefer ont peu d'influence sur le profil de vitesse, en revanche, l'inclinaison perturbe le champ de vitesse tangentielle et normale. Plus l'angle augmente, plus la vitesse sera importante (*Figure 27*).



**Figure 27. Evolution du profil de vitesse normale et tangentielle pour différentes configurations à une vitesse de 0,7 m/s (Chattelier, 2010)**

De nombreux paramètres géométriques influencent l'écoulement. De ce fait, l'estimation des pertes de charge doit prendre en compte l'ensemble de ces paramètres. Différents chercheurs ont tenté de formuler une loi théorique en essayant de distinguer les différents paramètres influents le coefficient de perte de charge (facteur de forme, angle, porosité, espacement de l'entrefer, longueur,...). Par comparaison avec des mesures expérimentales, Meusburger (2001) en a reformulé le coefficient de perte de charge  $K$  défini par l'équation (2).

$$K = k_f (1 + B \cdot \tan \delta) \times p^c \times \left(\frac{b}{l}\right)^D \times \sin \alpha \quad (2)$$

avec  $k_f$  un facteur de forme,  $\delta$  l'angle,  $p$  un coefficient de blocage,  $b$  l'entrefer,  $l$  la largeur des barres,  $\alpha$  l'angle de l'écoulement,  $B$  un coefficient de 0,65,  $C$  un coefficient de 1,33 et  $D$  un coefficient de - 0,43.

## Bilan

Les grilles ont un impact important sur la forme de l'écoulement, aussi bien à l'échelle locale, qu'à l'échelle globale. Le comportement hydrodynamique est fortement dépendant de la géométrie des orifices. A l'échelle locale, les champs de vitesse ou les phénomènes de turbulence dépendront fortement de la taille des orifices. De ce fait, différentes tailles d'orifices mériteraient d'être étudiées sur l'ouvrage. L'influence de la grille est également visible à l'échelle globale. Les mécanismes de pertes de charge, essentiels au dimensionnement, sont fortement liés à la porosité. Cependant, d'autres paramètres entrent en jeu comme par exemple la forme des orifices, la largeur de l'entrefer ou encore l'inclinaison de la grille avec l'écoulement. Ainsi, l'ensemble de ces critères sera à prendre en compte dans l'analyse des pertes de charge de la grille.

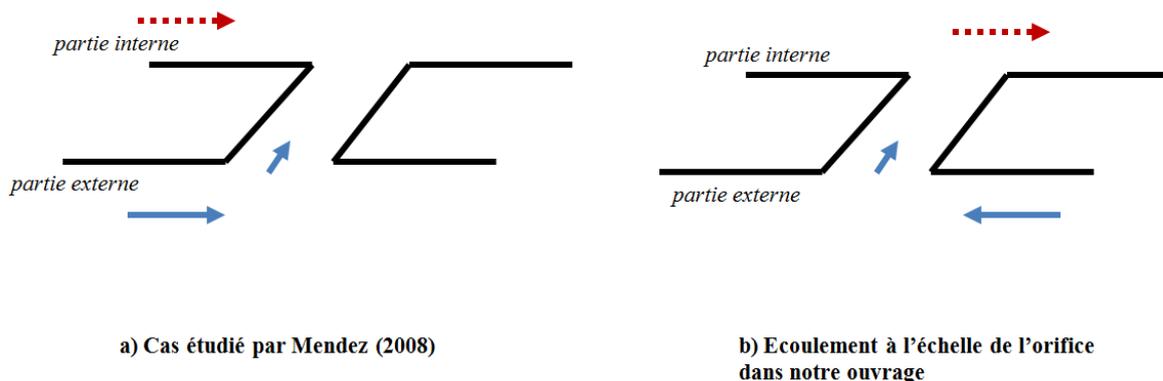
### 3. COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE A L'ECHELLE DE L'ORIFICE

L'un des objectifs de la thèse consiste à observer l'influence des phénomènes physiques à l'échelle des orifices sur le colmatage et la rétention de particules. Pour arriver à ce but, il est nécessaire d'observer préalablement le comportement hydraulique à proximité immédiate des orifices.

Contrairement à une grille classique, la grille de type métal déployé, que l'on cherche à mettre en place dans l'ouvrage, possède une géométrie que l'on peut qualifier de "complexe". L'acquisition de mesures à cette échelle, et notamment au niveau de l'entrefer, est très contraignante. Dans ce cas, la modélisation numérique devient incontournable pour visualiser le comportement hydrodynamique.

Si l'on ne retrouve aucune publication scientifique sur cette thématique en assainissement, on peut se référer en revanche à des études concernant les jets transverses, cas classique en mécanique des fluides. Ce type de configuration présente de nombreux intérêts : zone de mélange, dispersion de polluants, formation de structures tourbillonnaires, changement de trajectoires, etc... En revanche, on ne retrouve que très peu d'études sur les jets inclinés (cas des grilles utilisées pour la séparation tangentielle).

Les travaux de recherche effectués par Mendez (2007) pour mieux comprendre les phénomènes à proximité d'une paroi multi-perforée peuvent nous permettre de tirer quelques conclusions intéressantes. Son cas d'étude est très proche du nôtre puisqu'il souhaite modéliser l'écoulement au sein d'un orifice incliné (*Figure 28*). La seule différence est que dans notre cas, l'écoulement dans la partie centrale est piloté par la forme de la grille.



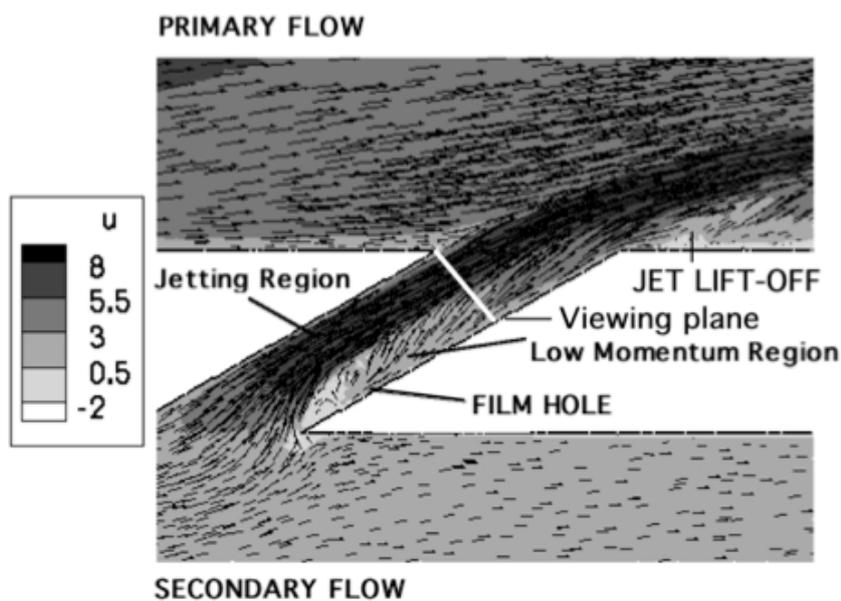
*Figure 28. Différences entre le cas étudié par Mendez (2008) et l'écoulement au niveau des orifices de la grille à métal déployé du CycloneSep®*

#### Comportement hydrodynamique

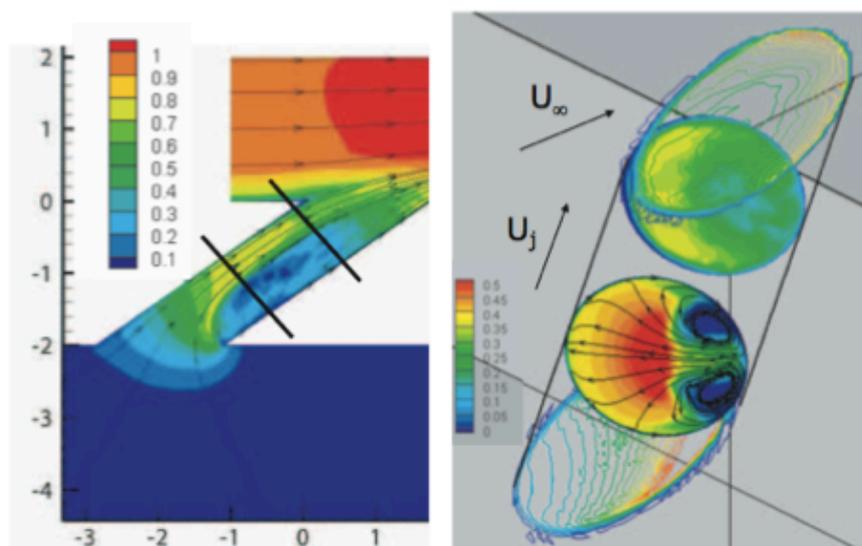
D'un point de vue hydrodynamique, on observe à travers les résultats de simulation la trajectoire particulière de l'écoulement. On constate la présence d'une zone de recirculation au niveau de

l'entrefer. Cette zone provoque la contraction de l'écoulement sur le côté opposé et augmente par ailleurs sa vitesse. Mendez (2007) fait également référence dans sa partie bibliographique aux travaux de Peet (2006), dans lesquels on observe également ces phénomènes de recirculations. De plus, on constate la présence de deux recirculations verticales (*Figure 30*).

Ces phénomènes étant très certainement liés à la forme du jet, on peut s'attendre à observer de tels phénomènes avec une grille de type métal déployé.



*Figure 29. Champs de vitesse moyens au sein d'un orifice (Mendez, 2007)*



*Figure 30. Champs de vitesse moyens au sein d'un orifice (Peet, 2006)*

### **Modèles numériques utilisés**

Cette étude nous permet également de dégager les méthodes numériques utilisées pour obtenir de tels résultats. Mendez (2007), tout comme Peet (2006), ont eu recours à la Simulation des Grandes Echelles (*LES*) avec un modèle sous maille *WALE* dans l'objectif de visualiser les phénomènes instationnaires (voir *Partie 3* et *Annexe B* pour la description des méthodes numériques). D'autre part, l'un des objectifs de ces travaux est de mettre en place un modèle représentatif prenant en compte les flux pariétaux, et ceci passe par une discrétisation très fine proche des parois. Une analyse de sensibilité au maillage a permis d'établir le modèle optimal. Un modèle constitué de 1 500 000 mailles en raffinant près des parois ( $y^+ \approx 5$ ) permet d'obtenir la même dynamique de l'écoulement qu'en utilisant un modèle avec 25 000 000 mailles. Pour arriver à de tels résultats, la largeur de l'orifice doit être composée d'une quinzaine de nœuds.

### **Bilan**

Cette partie montre très clairement la puissance des outils numériques. Une fois le modèle validé, la méthode numérique permet d'observer des phénomènes physiques difficilement mesurables avec l'expérimentation. L'inclinaison de la perforation a montré par exemple la présence de recirculations dans l'entrefer et un gradient de vitesse important. D'autre part, les modèles utilisés pour pouvoir reproduire ces phénomènes nécessitent une discrétisation spatiale très fine. Ainsi, dans l'objectif de reproduire les écoulements au sein des ouvertures de la grille, nous devons passer par une approche similaire, à savoir un maillage très fin. Cependant, en raison du nombre important d'orifices présents sur la surface de la grille, une approche particulière devra être mise en place face à cette problématique.

## IV. MODELISATION NUMERIQUE ET APPROCHES MULTI-EHELLES

En hydraulique urbaine, l'approche numérique est très répandue. De nombreux chercheurs ont recouru à cette approche pour reproduire les écoulements en utilisant des méthodes plus ou moins complexes. En effet, l'ensemble des phénomènes peuvent être décrits par des équations mathématiques : les équations de Navier-Stokes. Ces lois issues de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement permettent, a priori, de reproduire n'importe quel phénomène physique. Malgré les progrès en termes de puissance informatique, l'obtention d'une solution numérique directe est réservée à des cas très particuliers. Différentes approches sont utilisées pour arriver à une solution approximée (équation Barré de Saint-Venant, *RANS*, *LES*, *DES*...). Par conséquent, le choix d'une méthode doit être fait et repose généralement sur les phénomènes physiques que l'on cherche à reproduire. L'objectif de cette partie consiste à lister les différentes méthodes numériques utilisées pour modéliser les ouvrages et les grilles. En deuxième partie, nous discuterons des techniques numériques multi-échelles permettant de résoudre la problématique liée à la discrétisation du domaine. En effet, l'observation des phénomènes physiques que l'on souhaite reproduire, à l'échelle de l'orifice et à l'échelle de l'ouvrage, passe par un modèle déterministe utilisant un maillage à la fois fin et volumineux. Ainsi, la deuxième partie permettra de discuter des différentes techniques permettant de répondre éventuellement à notre problématique.

### 1. MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS ET DU TRANSPORT SOLIDE DANS LES OUVRAGES

#### Approches modélisatrices des écoulements turbulents

En assainissement, les écoulements rencontrés sont généralement turbulents. Cette turbulence se caractérise par des fluctuations de vitesse et de pression autour de leurs valeurs moyennes. Si elle est facilement décelable avec l'expérimentation, elle peut être difficilement reproduite via la modélisation, notamment dans le cas de fluctuations à très haute fréquence et à petites échelles. Il existe pour cela différentes approches pour modéliser la turbulence au sein d'un écoulement :

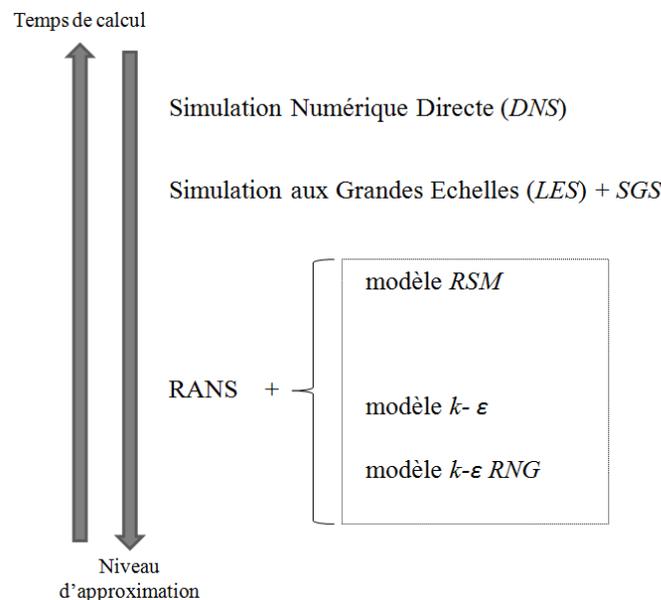
- la méthode statistique (*RANS* pour *Reynolds Averaged Navier Stokes*)
- la simulation des grandes échelles (*LES* pour *Large Eddy Simulation*)
- la simulation numérique directe (*DNS* pour *Direct Numerical Simulation*)

La différence entre ces approches réside dans le niveau d'approximation et le temps de calcul pour simuler l'écoulement (*Figure 31*). Par exemple, la méthode *RANS* permet de simuler l'écoulement

moyen. Il s'agit de la technique la plus courante et la plus rapide à mettre en œuvre. Elle a cependant recourt à un "modèle de turbulence" pour fermer le système d'équations. D'un point de vue mathématique, ce modèle de turbulence est plus ou moins complexe. Son choix se fera en fonction du type d'écoulement et des phénomènes à reproduire, d'où la nécessité d'avoir une vaste banque de données pour comparer les écoulements.

L'approche numérique directe *DNS* est l'approche la plus complète pour modéliser un écoulement turbulent puisqu'elle consiste à résoudre directement les équations de Navier-Stokes. Cependant, une simulation directe nécessite des moyens informatiques extrêmement importants. En effet, la discrétisation du domaine étudié doit être suffisamment fine pour modéliser les plus petits tourbillons. La discrétisation temporelle doit également être très petite pour prendre en compte l'ensemble des phénomènes instationnaires. Les ouvrages étant trop volumineux par rapport à la discrétisation spatiale et temporelle à utiliser, nous pouvons considérer cette approche comme inadaptée à notre problème.

Pour observer les phénomènes instationnaires, l'approche la plus adaptée est la simulation des grandes échelles (*LES*). Cette méthode consiste à séparer les échelles en filtrant les équations de Navier-Stokes : les gros tourbillons sont directement résolus et les petits modélisés à l'aide d'un filtre sous-mailles (*SGS*). La non-résolution des «petits tourbillons» permet d'augmenter la discrétisation temporelle ainsi que la taille des mailles. Notons tout de même que la taille de la plus petite maille va conditionner la largeur du filtre utilisé. En plus d'avoir accès à l'évolution des grandeurs physiques au cours du temps, la *LES* est dispensée de modèle de turbulence, ce qui limite les incertitudes liées à la bonne reproduction d'une transition de régime laminaire-turbulent.



**Figure 31. Représentation schématique de la modélisation d'un écoulement turbulent (inspiré de Andersson et al., 2012)**

## Modélisation de l'écoulement dans les ouvrages

De nombreux chercheurs se sont intéressés à la modélisation des écoulements au sein des ouvrages en assainissement. La littérature montre que l'approche *RANS* est habituellement utilisée pour reproduire ces écoulements. La seule différence concerne le choix du modèle de turbulence. En effet, ce dernier est choisi en fonction des phénomènes physiques que l'on souhaite reproduire.

Le modèle *k-ε* standard revient dans de nombreux articles et a fait l'objet de validations via des expérimentations pour des ouvrages rectangulaires (Dufresne, 2008 ; Dufresne et al., 2009) ou circulaires (Quarini et al., 1996 ; Jayanti & Narayanan, 2004). Ce modèle permet notamment de reproduire les différentes zones de recirculations, horizontales ou verticales, présentes dans les bassins. Ce modèle a également été utilisé par Pathapati & Sansalone (2009) pour modéliser l'écoulement au sein d'un séparateur hydrodynamique.

D'autres auteurs ont recouru au modèle *k-ε RNG*. Il est également isotrope mais théoriquement plus adapté pour modéliser les écoulements tourbillonnaires (Ansys, 2012 ; Andersson et al. 2012 ; ERCOFTAC, 2000). Ce modèle est très certainement plus adapté pour les écoulements au sein des séparateurs hydrodynamiques. Des mesures sur des pilotes expérimentaux ont permis de valider l'utilisation du modèle *k-ε RNG* (Tyack & Fenner, 1999 ; Lee et al., 2010).

Lorsque l'écoulement devient plus complexe et que l'on souhaite prendre en compte les phénomènes anisotropes, l'utilisation d'un modèle *RSM* est préconisée (Jarman et al., 2008). Le modèle des contraintes de Reynolds a aussi été utilisé pour modéliser l'écoulement d'un bassin réel (Lipeme Kouyi et al., 2010) et pour un décanteur lamellaire à flux croisés (Vazquez et al., 2010). De plus, ce modèle est le plus recensé dans les études sur les hydrocyclones (Elsayed, 2011a ; Lee et al., 2006 ; Oliveira et al., 2009 ; Shukla et al., 2011) et les séparateurs hydrodynamiques (Egarr et al., 2004 ; Faram & Harwood, 2003 ; Pathapati et al., 2011).

Ces dernières années, l'évolution des outils informatiques a permis d'acquérir une puissance de calcul permettant de simuler "assez rapidement" l'écoulement via une approche *LES*. L'article de Nowakowski (2004) décrit cette méthode comme la plus complète pour capturer les dépendances du temps et les phénomènes instationnaires pouvant influencer l'efficacité du système. Shalaby et al. (2008) et Elsayed & Lacor (2013) ont déjà utilisé cette technique pour modéliser l'écoulement en régime instationnaire dans un hydrocyclone.

Ouvrage	Modèle	Phénomènes à reproduire	Auteurs
Bassin de décantation rectangulaire	$k-\varepsilon$	Ecoulement avec zones de recirculations	Dufresne, 2008
	$k-\varepsilon$		Dufresne et al., 2009
	<i>RSM</i>		Lipeme Kouyi et al., 2010
Bassin circulaire	$k-\varepsilon$	Ecoulement tourbillonnaire (vitesses faibles)	Quarini et al., 1996
	$k-\varepsilon$		Jayanti & Narayanan, 2004
Séparateur hydrodynamique	$k-\varepsilon$	Ecoulement tourbillonnaire (vitesses importantes)	Pathapati & Sansalone, 2009
	$k-\varepsilon$ RNG		Tyack & Fenner, 1999
	$k-\varepsilon$ RNG		Lee et al., 2010
	<i>RSM</i>		Egarr et al., 2004
	<i>RSM</i>		Faram & Harwood, 2003
Décanteur lamellaire	<i>RSM</i>	Répartition de l'écoulement entre des lames	Pathapati et al., 2011
	<i>RSM</i>		Vazquez et al., 2010
	<i>RSM</i>		Elsayed, 2011a
Hydrocyclones	<i>RSM</i>	Ecoulement tourbillonnaire Reproduction des phénomènes instationnaires (pour la <i>LES</i> )	Lee et al., 2006
	<i>RSM</i>		Oliveira et al., 2009
	<i>RSM</i>		Shukla et al., 2011
	<i>LES</i>		Shalaby et al., 2008
	<i>LES</i>		Elsayed & Lacor, 2013

**Tableau 5. Modèles utilisés pour reproduire les écoulements au sein des ouvrages de séparation**

Le *Tableau 5* permet de mettre en évidence les différents modèles utilisés dans les ouvrages de séparation. Pour les séparateurs, le modèle le plus utilisé est le *RSM*. Cependant, certaines études ont démontré qu'un modèle isotrope était suffisant pour reproduire les profils de vitesse. Ainsi, une analyse de sensibilité au modèle de turbulence sera réalisée dans cette thèse.

### **Modélisation de la surface libre**

En hydraulique, les écoulements à surface libre sont caractérisés par une interface physique entre l'eau et l'air : la surface libre. Dans les bassins de stockage, où l'entrée et la sortie sont des conduites en charge, la surface libre est généralement plane (Dufresne, 2008). En revanche, pour les ouvrages équipés de seuils déversants (bassin ou déversoir d'orage), d'obstacles ou encore les ouvrages de type séparateurs hydrodynamiques, la surface libre n'est pas plane. D'autre part, le séparateur étudié dispose d'une grille. Cet aménagement aura des répercussions sur la surface libre et pourra se traduire par des

différences de niveau entre l'extérieur et l'intérieur de la grille. En résumé, la position de la surface libre est un résultat que l'on cherche à déterminer.

Pour déterminer la position exacte de la surface libre, la méthode numérique employée est l'approche Volume of Fluid (*VOF*). Cette méthode consiste à définir une fraction volumique en air et en eau pour chaque cellule du maillage (Hirt & Nichols, 1981). Une interpolation permet ensuite de reconstruire la surface libre à partir des fractions en eau et en air de chaque cellule. Si le caractère bi-phasique du modèle ralentit considérablement le calcul, la méthode *VOF* permet en revanche de déterminer avec précision la position de la surface libre. On retrouve la méthode *VOF* dans les récentes recherches sur les bassins (Lipeme Kouyi et al., 2010 ; Dufresne et al., 2010 ; Yan et al., 2011). Cette approche est également utilisée dans les cas où le positionnement de la surface libre est un résultat recherché. Lipeme Kouyi et al. (2003) ainsi que Isel et al. (2013) ont modélisé la surface libre d'un déversoir d'orage pour déterminer l'emplacement idéal d'un capteur de mesure.

Dans le cas des surfaces libres horizontales, une des techniques la plus utilisée est la condition de symétrie. Cette condition stipule qu'il n'y a aucun écoulement à travers l'interface et que les variables à l'extérieur du domaine sont identiques à celles juste à l'intérieur, d'où l'appellation "symétrie". Le caractère monophasique du modèle a l'avantage de diminuer le temps de simulation. En revanche, cette méthode n'est applicable que pour des surfaces libres planes pour lesquelles les hauteurs d'eau sont connues. Stovin & Saul (1996), Adamsson et al. (2005) et Dufresne et al. (2009) ont utilisé cette méthode pour modéliser la surface libre dans des bassins de stockage-décantation. Cette méthode est également applicable pour simuler les écoulements dans les décanteurs lamellaires (Morin et al., 2009; Vazquez et al., 2010) où là encore la surface libre est plane.

Parmi ces deux méthodes, l'approche *VOF* semble être la plus intéressante pour modéliser l'écoulement dans le séparateur. Si la durée de simulation est plus importante, cette méthode permet de déterminer la position exacte de la surface libre, qui est un point clé dans notre étude. La comparaison des hauteurs d'eau entre l'intérieur et l'extérieur de la grille étant indispensable au calcul des pertes de charges, il est donc nécessaire d'observer ces différences via le modèle numérique.

### **Modélisation du transport solide**

Prédire l'efficacité d'un ouvrage en utilisant la modélisation du transport de particules est devenu un véritable challenge. On retrouve dans la littérature différentes approches pour modéliser le transport solide dans les ouvrages en assainissement : la méthode continue (ou eulérienne) et la méthode de suivi de particules (ou lagrangienne).

Dans la méthode Eulérienne, les particules de l'écoulement sont considérées comme un champ continu dont l'évolution est décrite par l'équation de convection-dispersion au sein du champ fluide, si les

particules sont représentées par des concentrations, ou par les équations de Navier-Stokes s'il s'agit d'une phase solide. Par conséquent, la solution finale est obtenue en résolvant les équations des deux phases liquide et solide. L'utilisation de cette approche est utile pour déterminer les profils de concentration de la phase solide au sein de l'écoulement. On retrouve cette méthode dans les travaux de Milisic & Chebbo (2005), Torres (2008) et de Morin et al. (2012).

L'approche lagrangienne consiste à suivre individuellement la trajectoire des particules en utilisant les caractéristiques du fluide porteur calculées préalablement. L'intégration d'un bilan de forces, à chaque pas de temps, permet de déterminer la trajectoire de chaque particule (Maxey & Riley, 1983). En revanche, l'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que l'écoulement ne peut pas être modifié par le transport solide. De ce fait, on utilise la méthode lagrangienne lorsque la phase particulaire représente moins de 0,1 % du volume total (Brennen, 2005), ce qui est généralement le cas en assainissement. De plus, étant donné la taille des particules en assainissement, les interactions entre les particules peuvent être négligées (Elgobashi, 1991).

La deuxième approche est donc généralement employée pour visualiser la trajectoire des particules. On retrouve dans la littérature de nombreux travaux évoquant la méthode lagrangienne pour modéliser le transport solide. Un suivi de particules a été utilisé pour déterminer l'efficacité des bassins de stockage (Stovin & Saul, 1998 ; Jayanti & Narayanan, 2004 ; Dufresne et al., 2009 ; Vosswinkel et al., 2012). Cette approche a notamment permis d'observer l'influence des zones de recirculation sur les zones préférentielles de dépôts. Par ailleurs, les travaux de Dufresne (2008) ont mis en avant l'influence de l'énergie cinétique turbulente et des contraintes de cisaillement au fond sur la dispersion des particules. La *Figure 32* démontre que les zones turbulentes sont dépourvues de particules. Par conséquent, l'énergie cinétique turbulente sera l'une des variables à analyser, et particulièrement à proximité de la grille. En effet, si ces grandeurs permettent de disperser le transport solide, nous pouvons faire l'hypothèse que les phénomènes turbulents à proximité des orifices permettront éventuellement d'éloigner les polluants de la grille.

L'approche lagrangienne a également été utilisée pour modéliser le transport de particules dans des séparateurs hydrodynamiques. Si l'objectif dans ces ouvrages n'est pas d'observer les zones de dépôts, la technique est souvent employée pour tester la sensibilité des caractéristiques des particules. En effet, dans les travaux de Lee et al. (2010) ou Pathapati et al. (2009), l'approche lagrangienne permet de tester différents paramètres de particules en faisant varier les diamètres et la masse volumique des particules. Une autre utilisation de cette méthode est visible dans les travaux d'Egarr et al. (2004) ou Faram & Harwood (2003). L'utilisation de l'approche lagrangienne est appliquée pour visualiser l'influence d'aménagements dans l'ouvrage sur le transport solide, et donc sur l'efficacité de l'ouvrage. Le suivi de particules est donc un moyen de déterminer l'efficacité dans un objectif d'optimisation.

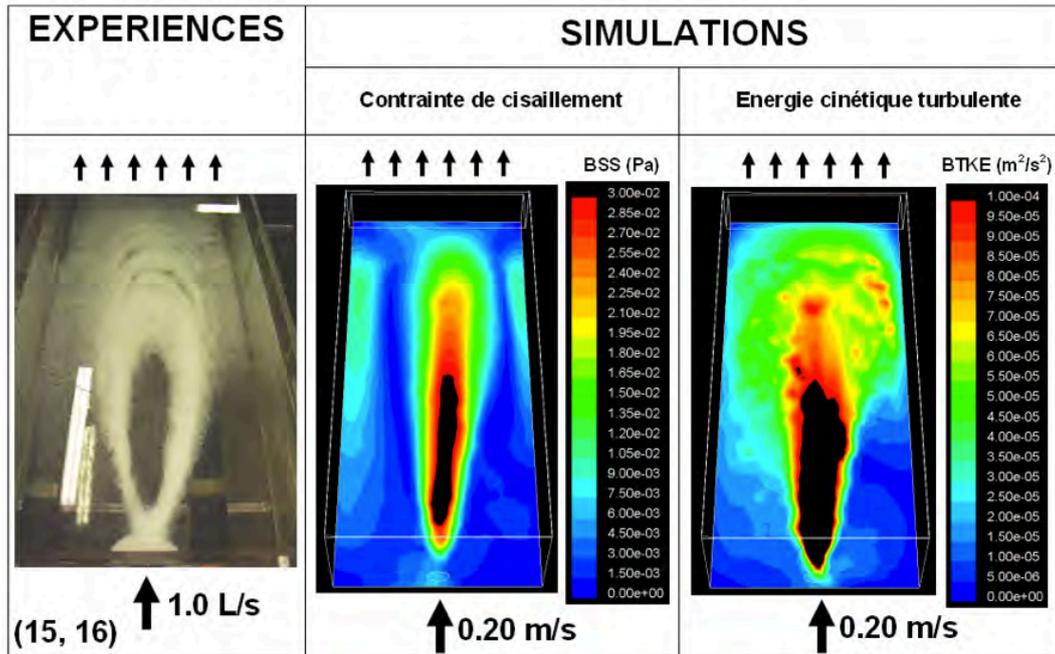


Figure 32. Comparaison de la position des dépôts avec les contraintes de cisaillement au fond et le champ d'énergie cinétique turbulente

Si la modélisation du transport de particules a fait l'objet de nombreuses études, que ce soit en assainissement ou dans d'autres domaines, la modélisation 3D du transport de polluants de type "macro-déchets" se fait plus rare. D'après nos recherches bibliographiques, aucun chercheur n'a essayé de modéliser le transport de macro-déchets au sein d'un ouvrage. Cette observation provient certainement du fait que la nature, la forme ou encore les matériaux constitués par les déchets sont très diversifiés. Il est donc difficile de modéliser l'ensemble de ces comportements et les différentes interactions avec l'écoulement.

## Bilan

L'étude bibliographique a mis en avant la grande diversité des méthodes numériques utilisées pour modéliser l'écoulement et le transport solide dans les ouvrages de séparation. L'approche *RANS* est la méthode la plus intéressante pour reproduire les phénomènes que l'on souhaite observer : champ de vitesse, surface libre, turbulence... Le désavantage de cette méthode est qu'elle nécessite un modèle de turbulence pour fermer le système d'équation. Là encore, les travaux antérieurs réalisés sur les séparateurs ont démontré que le choix d'un modèle de turbulence n'était pas immédiat. Une comparaison avec des données expérimentales est ainsi nécessaire pour valider le modèle. De ce fait, les mesures expérimentales effectuées sur le pilote seront indispensables pour valider le modèle numérique. D'autre part, l'approche *LES* peut être envisagée dans la thèse. Nous avons vu que cette

technique permet d'avoir accès aux phénomènes instationnaires et semble intéressante pour visualiser notamment les dépendances du temps à proximité des orifices.

Concernant la modélisation du transport solide, l'utilisation d'une approche lagrangienne semble être la méthode idéale pour notre étude. Elle permettra d'observer l'influence des phénomènes physiques, comme les effets de pression ou la turbulence, avec la trajectoire des particules. D'autre part, le suivi de particules permettra de tester différentes caractéristiques de particules, dans l'objectif de définir la sensibilité de l'ouvrage à retenir des particules.

## **2. LES APPROCHES MULTI-ECHELLES**

L'efficacité du séparateur hydrodynamique disposant d'une grille est jugée sur deux critères : sa capacité à retenir les polluants et sa capacité à éviter le colmatage. Par conséquent, notre modèle numérique doit pouvoir prendre en compte ces deux critères. En d'autres termes, le modèle numérique doit reproduire l'écoulement à travers l'ouvrage tout en prenant en compte les phénomènes physiques à proximité de la grille. Pour reproduire de manière déterministe l'ensemble de ces phénomènes, notre modèle doit posséder un maillage extrêmement fin pour modéliser l'écoulement dans les orifices de la grille, mais il doit également être volumineux étant donné la taille de l'ouvrage. L'utilisation d'un tel modèle est très problématique puisqu'il nécessite un maillage extrêmement dense et nécessitera un temps de calcul très important. Rajoutons à cela le besoin de posséder des moyens informatiques puissants. Dans ce contexte, nous avons cherché dans la littérature les techniques existantes permettant de répondre à cette problématique.

### **Les approches possibles**

Il existe plusieurs approches pour visualiser les phénomènes multi-échelles. E et al. (2007) ont passé en revue les différentes approches et les ont classées en fonction des techniques utilisées. Les techniques dites "classiques" sont généralement utilisées pour la résolution de problèmes à petite échelle : méthode "*multigrid*", méthode de décomposition du domaine, méthode d'adaptation du maillage, etc. Ces approches "classiques" utilisent un unique modèle mais sont limitées par la taille entre les échelles. Dans le cas du séparateur, nous devons modéliser des phénomènes allant du dixième de millimètre (orifice) au mètre (ouvrage). Autant dire que les techniques "classiques" sont difficilement applicables.

Pour des problématiques de ce type, lorsque l'échelle spatiale entre les phénomènes est importante, les techniques d'homogénéisation sont souvent employées. Techniquement, le principe consiste à séparer les échelles en sous-modèles. Un premier modèle est utilisé pour reproduire le comportement global au sein du système dans lequel les phénomènes aux petites échelles sont reproduits de manière

conceptuelle. Un second sous-modèle est construit pour modéliser "finement" les phénomènes physiques aux petites échelles.

### Interactions entre les échelles et technique d'homogénéisation par un milieu poreux

La principale difficulté dans les stratégies multi-échelles est de coupler les échelles entre elles. En effet, même si l'échelle spatiale n'est pas la même, il existe tout de même des interactions entre les échelles qu'il faut prendre en compte dans la modélisation. En d'autres termes, le modèle à l'échelle macroscopique, utilisant une approche conceptuelle, nécessite un "calage". Ainsi, il faut établir des relations permettant de passer d'une échelle à l'autre. L'approche usuellement utilisée dans ce cadre est la technique d'homogénéisation (Brizzi, 2009). Elle consiste à "moyenner" le comportement à l'échelle "micro" et de reproduire ce comportement "équivalent" à l'échelle "macro" (Figure 33).

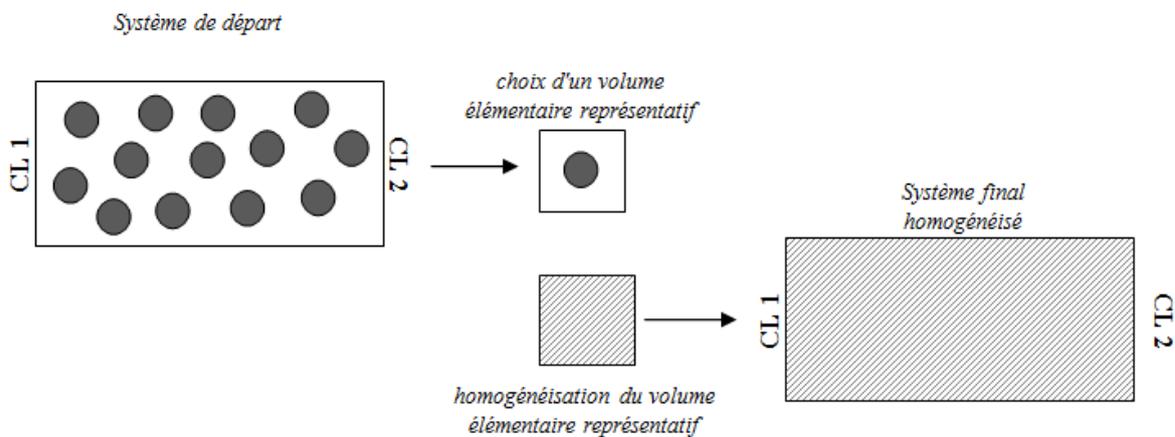


Figure 33. Représentation schématique d'une technique d'homogénéisation

En mécanique des fluides, les techniques d'homogénéisation portent généralement sur des transferts de flux à travers des milieux poreux (Brizzi, 2009 ; Jamet, 2007). Effectivement, en partant du postulat qu'à très grande échelle le comportement de petites structures hétérogènes adopte un comportement moyen homogène, on peut faire référence au cas particulier des milieux poreux pour reproduire les phénomènes à l'échelle "macro".

### Modèle conceptuel d'une grille par un milieu poreux

Généralement, on associe le terme de milieu poreux à la formulation de Darcy. En effet, ses travaux ont permis d'établir des relations permettant de déterminer des débits traversant des massifs poreux homogènes. Valable uniquement en régime laminaire, la formulation de Darcy a subi de nombreuses

transformations pour augmenter son champ d'application. La formulation actuelle est définie par l'équation (3).

$$\vec{u} = -\frac{k}{\mu}(\vec{\text{grad}} p - \rho\vec{g}) \quad (3)$$

avec  $\vec{u}$  la vitesse de filtration,  $p$  la pression,  $\mu$  la viscosité dynamique,  $\rho$  la masse volumique et  $k$  la perméabilité du milieu.

Pour appliquer la formulation de Darcy en régime turbulent, Forchheimer (1901) a suggéré qu'un fluide qui traverse un milieu poreux pouvait être représenté par une équation quadratique (Venkataraman & Rao, 1998). Sa formulation est représentée par l'équation (4).

$$I = aV + bV^2 \quad (4)$$

avec  $I$  le gradient hydraulique,  $V$  la vitesse,  $a$  une constante dépendante de la nature du fluide et  $b$  une constante dépendante des propriétés du milieu poreux.

L'étude expérimentale de Santiago (2007) a montré que l'écoulement à travers les grilles répondait à cette formulation. L'auteur a mis en évidence une non-linéarité entre la perte de charge et le carré de la vitesse (Figure 34). En régime laminaire, on observe un comportement linéaire avec la vitesse. En revanche, en régime turbulent, le comportement évolue par rapport au carré de la vitesse.

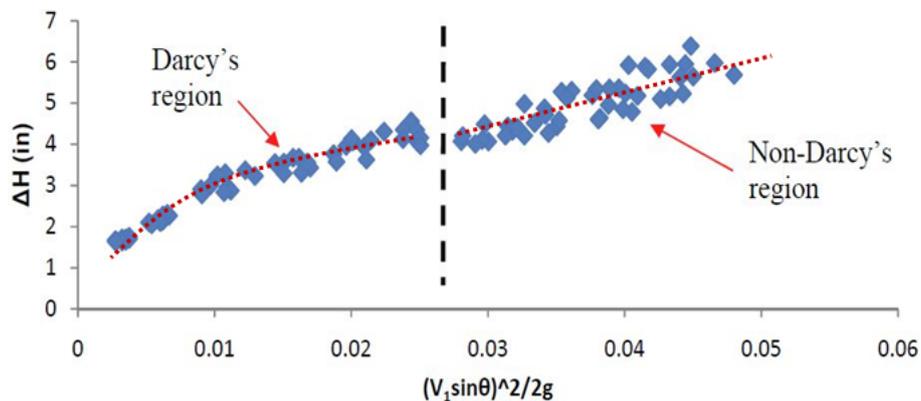


Figure 34. Visualisation de la transition de régime à partir de mesures expérimentales (Santiago, 2007)

La confrontation de ces résultats permet de mettre avant deux aspects importants pour ce travail de thèse. Le premier est que l'écoulement à travers une grille peut être modélisé par un milieu poreux. La deuxième remarque que l'on peut faire concerne le champ d'application. En effet, ces lois sont valables aussi bien en régime laminaire qu'en régime turbulent. Pour résumer, la grille peut être remplacée en utilisant une approche conceptuelle de type milieu poreux pour reproduire l'écoulement turbulent au sein de l'ouvrage.

### **Utilisation d'une approche conceptuelle de type milieu poreux**

Les applications des résultats cités ci-dessus sont peu nombreuses en assainissement.

Pour simplifier son modèle numérique, Pathapati et al., (2009 et 2011) ont modélisé la grille d'un séparateur hydrodynamique par un milieu poreux. Cette technique a permis de modéliser le comportement global de l'ouvrage, tout en diminuant le temps de calcul. Cette méthode a néanmoins nécessité l'importation de données expérimentales. Des mesures de pression de part et d'autre de la grille ont été réalisées de manière à caler les coefficients du milieu poreux dans la modélisation.

Concernant les ouvrages hydrauliques, on peut également faire référence aux travaux de Morin et al. (Morin et al., 2009) qui ont modélisé les lamelles d'un décanteur par un bloc poreux.

Dans sa thèse, Chandesris (2006) a utilisé l'homogénéisation par un milieu poreux en régime turbulent pour l'étude multi-échelle du cœur d'un réacteur nucléaire. Son travail a consisté à modéliser l'écoulement dans la région combustible en utilisant une approche type milieu poreux et à déterminer les conditions permettant de modéliser les interfaces région libre/région poreuse.

La difficulté dans les approches conceptuelles est de déterminer le coefficient de calage. Ce coefficient est important puisqu'il permet de lier les deux échelles spatiales. Pour notre ouvrage, l'application d'un milieu poreux pour représenter la grille est totalement envisageable. Par ailleurs, la méthode utilisée par Pathapati et al., (2009 et 2011) est intéressante car le calage s'effectue sur des grandeurs locales (pertes de pression engendrées par la grille). De cette manière, l'influence des phénomènes locaux est reproduite à l'échelle globale. Par conséquent, dans notre étude, le calage pourrait s'effectuer en cherchant à reproduire par exemple les pertes de charge, qui est un point clé de notre étude.

### **Les approches descendantes et ascendantes**

Avoir recourt à des cascades de modèles pour modéliser des comportements à différentes échelles est une méthode très utile. En revanche, il est nécessaire d'assurer une continuité entre ces modèles. De ce fait, on distingue dans la littérature deux approches différentes.

La méthode descendante (*down-scaling* en anglais) consiste à simuler le comportement global du système et à intégrer les résultats obtenus à l'échelle inférieure en utilisant au niveau des conditions aux limites les valeurs de l'échelle globale. Les illustrations de Jamet (2007) mettent en avant une cascade de modèles en utilisant une approche descendante. La simulation d'un système à grande échelle a permis de reproduire les conditions instantanées locales à plus petite échelle (*Figure 35*).

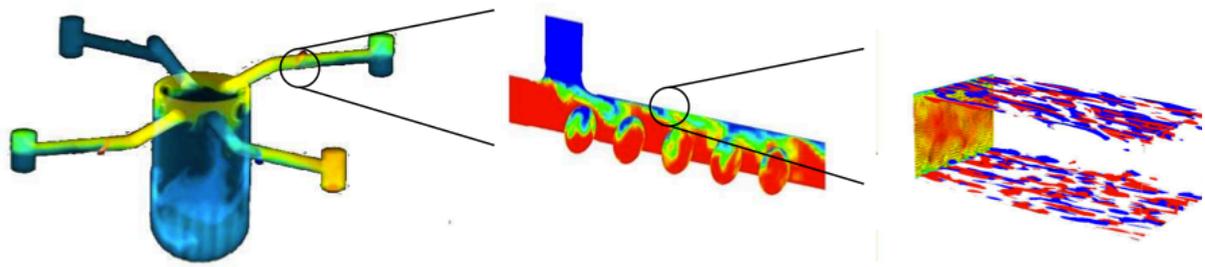


Figure 35. Exemple d'une approche multi-échelle descendante d'un réacteur (Jamet, 2007)

Inversement, l'approche ascendante (*up-scaling* en anglais) consiste à utiliser les valeurs obtenues à l'échelle la plus fine et de remonter dans les échelles spatiales et construire les modèles à plus grande échelle.

Précédemment, nous avons discuté de l'importance de connaître les caractéristiques physiques de la grille et de leur influence sur le comportement hydrodynamique. Par conséquent, dans l'éventualité que le calage s'effectue sur les pertes de charge de la grille, il est primordial de calculer la perte énergétique à l'aide d'un modèle déterministe puis d'injecter ces pertes dans un modèle conceptuel. L'approche à utiliser est donc ascendante.

### Bilan

Cette partie avait pour objectif de déterminer un moyen pratique permettant de modéliser l'écoulement dans le séparateur hydrodynamique. L'application d'une méthode multi-échelle de type *up-scaling* semble être la plus adaptée à notre problème. L'utilisation d'un modèle déterministe devrait nous permettre de modéliser "finement" les phénomènes physiques à proximité de la grille. A partir de ce modèle, nous devrions déterminer la perte énergétique liée à la singularité et ainsi disposer d'un coefficient de calage pour l'approche conceptuelle de grille. De plus, l'utilisation d'une approche par un milieu poreux permet de reproduire le comportement global d'une grille quel que soit le régime de l'écoulement.

## CONCLUSION DE LA PARTIE 1

Cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence la performance des séparateurs hydrodynamiques pour capturer les macro-déchets. Contrairement aux ouvrages de décantation destinés à la capture des particules fines, les séparateurs hydrodynamiques sont plus adaptés à la rétention des macro-déchets. La présence des grilles dans les ouvrages de dernière génération permet de retenir les flottants ainsi que les déchets supérieurs à la taille des ouvertures de la grille. En revanche, l'ajout des grilles est bien souvent problématique. Des phénomènes de colmatage peuvent se produire induisant un dysfonctionnement de l'ouvrage. Pour limiter ces phénomènes, la séparation tangentielle est aujourd'hui présente sur plusieurs séparateurs hydrodynamiques. Pour un bon fonctionnement, on peut supposer que les vitesses tangentielles doivent être rapides et uniformes le long de la grille. Ces deux aspects sont donc recherchés dans le CycloneSep<sup>®</sup>. Cependant, l'étude bibliographique a mis en évidence les difficultés à prévoir l'écoulement dans un ouvrage aussi complexe. De ce fait, la caractérisation de l'écoulement passe par une étude expérimentale. D'autre part, on retrouve dans la littérature de nombreux articles qui montrent la performance des séparateurs à retenir la pollution particulaire. Si les particules retenues sont généralement supérieures à 75  $\mu\text{m}$ , elles restent néanmoins largement inférieures à la taille des ouvertures. Ce constat laisse à penser qu'il existe des phénomènes physiques locaux permettant d'améliorer la performance des séparateurs. Ces phénomènes seront donc à étudier expérimentalement et numériquement.

La seconde partie a montré l'influence de la forme de la grille sur les propriétés de l'écoulement. En effet, les caractéristiques géométriques des grilles entrent en jeu dans les mécanismes de perte de charge. Ces pertes de charge, indispensables au dimensionnement de l'ouvrage, dépendent de plusieurs facteurs et sont propres à chaque grille (porosité, forme des orifices, inclinaison avec l'écoulement,...). L'influence des caractéristiques se constate également à l'échelle locale. Nous avons vu par exemple que suivant la forme de la grille et des ouvertures, les phénomènes physiques comme les champs de vitesse ou les phénomènes de turbulence seront différents. A l'échelle de l'orifice, les phénomènes physiques sont là aussi dépendants de la forme, notamment lorsque l'orifice est incliné. En raison des difficultés à mesurer les phénomènes physiques à cette échelle, la modélisation numérique devient une approche complémentaire. La principale problématique concerne la puissance de calcul à posséder pour simuler de tels écoulements. Les modèles doivent être finement détaillés de manière à reproduire l'ensemble des phénomènes physiques.

L'approche numérique, et particulièrement la modélisation 3D, est devenue un outil incontournable en hydraulique pour tester ou optimiser un ouvrage. En revanche, face à la diversité des méthodes numériques, il est nécessaire de valider les modèles. Cette validation s'effectue généralement par comparaison avec des données expérimentales. D'autre part, dans l'objectif d'obtenir un modèle

numérique permettant de modéliser l'écoulement dans l'ouvrage ainsi que les phénomènes physiques à l'échelle des orifices, une approche particulière doit être développée. Les éléments de la littérature nous permettent de définir l'approche multi-échelle de type *up-scaling* comme la technique la plus appropriée à notre problème.

Une fois validée, le modèle numérique devient un outil très puissant. Il permet par exemple de tester différentes configurations à moindre coût. L'autre avantage du numérique réside également dans le fait de pouvoir tester différentes configurations. Dans ce contexte, nous utiliserons cette méthode pour tenter d'optimiser le fonctionnement de l'ouvrage en cherchant la configuration la moins propice au colmatage.

Par ailleurs, les méthodes numériques sont très utiles pour comprendre les écoulements dans les ouvrages où l'expérimentation est difficile. En effet, l'étude expérimentale sur un ouvrage réel est très contraignante en raison des difficultés à contrôler les différentes variables (intensité et durée des événements pluvieux, nature de la pollution, maîtrise des débits,...). L'utilisation d'un modèle numérique pour reproduire l'écoulement prend ici tout son sens. En revanche, l'étude de terrain reste l'approche la plus aboutie pour observer l'efficacité réelle de l'ouvrage.



# PARTIE 2

## ETUDE EXPERIMENTALE

---

<b>Introduction de la partie 2 .....</b>	<b>60</b>
<b>I. Dispositif expérimental.....</b>	<b>61</b>
1. Pilote expérimental .....	61
1.1 Similitudes avec un ouvrage réel.....	61
1.2 Circuit hydraulique.....	62
1.3 Configurations possibles .....	63
1.4 Banc de déplacement.....	65
1.5 Automate .....	66
2. Instrumentation et incertitudes .....	67
2.1 Mesure des débits .....	67
2.2 Mesure des vitesses .....	67
2.3 Mesure de la turbulence.....	70
2.4 Mesure de la surface libre.....	70
2.5 Incertitudes de mesures .....	73
2.6 Reproductibilité et répétabilité des expériences .....	74
3. Transport solide .....	75
3.1 Expériences avec des macro-déchets.....	75
3.2 Expériences avec des MES.....	76
<b>II. Caractéristiques hydrodynamiques.....</b>	<b>79</b>
1. A l'échelle de l'ouvrage.....	79
1.1 Vitesse .....	79
1.2 Analyse des débits .....	85
1.3 Analyse de la surface libre .....	90
1.4 Pertes de charge.....	94
2. A l'échelle de la grille .....	97
2.1 Vitesses à proximité de la grille .....	98
2.2 Turbulence à proximité de la grille .....	99
<b>III. Transport solide .....</b>	<b>102</b>
1. Efficacité du pilote à retenir les macro-déchets.....	102
1.1 Analyse qualitative de la trajectoire des macro-déchets.....	102
1.2 Etude du colmatage de la grille .....	103
1.3 Etude du colmatage en régime transitoire .....	105
2. Efficacité du pilote à retenir des particules .....	106
2.1 Analyse qualitative de la trajectoire des MES dans le pilote .....	106
2.2 Analyse de l'influence de la grille .....	109
<b>Conclusion de la partie 2 .....</b>	<b>113</b>

## INTRODUCTION DE LA PARTIE 2

L'étude bibliographique a permis de mettre en avant l'influence d'une grille au sein d'un ouvrage de séparation.

D'un point de vue hydraulique, l'aménagement d'une grille perturbe l'écoulement. Elle engendre des mécanismes de pertes de charge avec des conséquences visibles à l'échelle globale. Ces pertes de charges doivent être déterminées et prises en considération dans le dimensionnement de l'ouvrage. D'autre part, nous avons remarqué la forte influence des caractéristiques géométriques des grilles aussi bien sur les pertes de charge que sur les phénomènes physiques à proximité des orifices. De ce fait, l'utilisation de différentes formes de grille mérite d'être étudiée dans ce chapitre. L'utilisation d'un pilote expérimental aura donc pour but de caractériser l'écoulement dans l'ouvrage et de déterminer l'influence des phénomènes locaux engendrés par la grille.

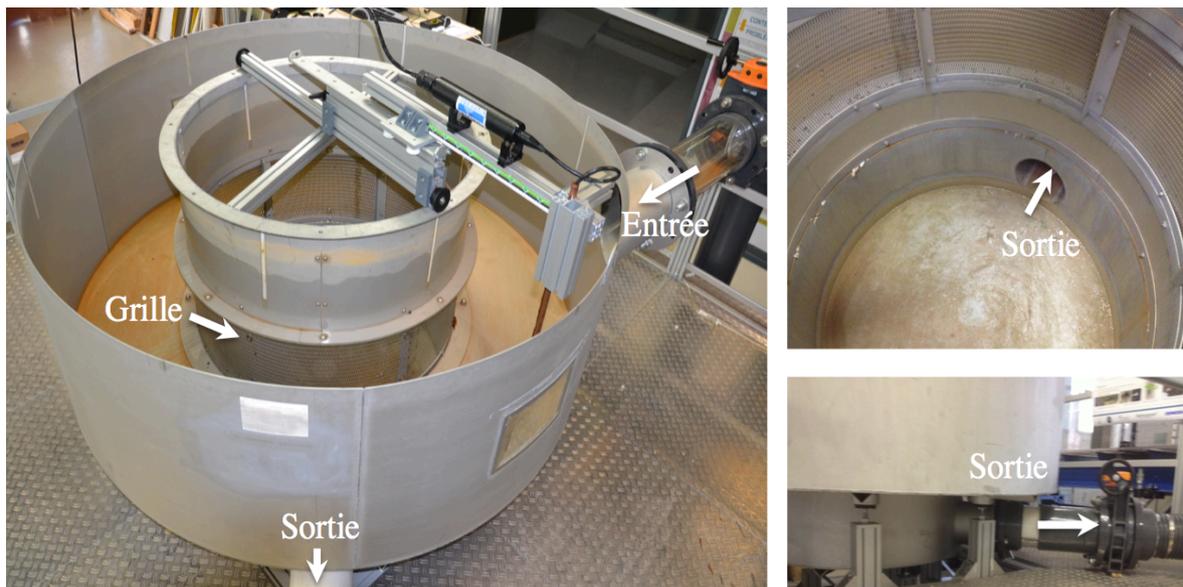
La fonction principale de l'ouvrage est de capturer les macro-déchets. Même si la bibliographie est pauvre sur ce sujet, elle décrit tout de même les techniques de séparation tangentielle comme les moins sensibles au colmatage. En fonction de la nature de l'écoulement et du type de polluant, des obstructions des orifices peuvent toutefois avoir lieu. Sachant que la forme de la grille permet d'obtenir des comportements hydrauliques différents, on peut supposer que la forme permet d'obtenir des comportements différents vis-à-vis du transport solide. Dans ce contexte, l'objectif va être de tester l'influence de la forme de la grille sur les phénomènes de colmatage et de déterminer la forme optimale de la grille permettant de limiter ces phénomènes. D'autre part, l'aptitude des séparateurs à retenir des fines particules a été mise en avant dans la bibliographie. Des tests de transport de particules seront donc réalisés pour tenter de déterminer l'influence de la forme des grilles sur l'efficacité de l'ouvrage. La comparaison avec les phénomènes hydrodynamiques produits à proximité immédiate des orifices permettront d'émettre des hypothèses.

Si l'objectif de l'étude expérimentale est de comprendre et mesurer les différents phénomènes physiques, cette partie doit également permettre d'établir une base de données nécessaire à la validation des méthodes numériques utilisées dans la suite de la thèse.

# I. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

## 1. PILOTE EXPERIMENTAL

Le pilote expérimental (*Figure 36*) est un bassin circulaire de 2 m de diamètre sur 1 m de haut. La grille et les couronnes internes possèdent un diamètre de 1 m. L'entrée est constituée d'une conduite circulaire de diamètre 0,2 m, dont la base est située 0,8 m au-dessus du fond du bassin. Elle est positionnée tangentiellement de façon à alimenter le bassin au centre de la section. La sortie est également une conduite circulaire de 0,2 m de diamètre, dont la base est située 0,05 m au-dessus du fond. L'angle entre les deux conduites est de  $116^\circ$ .



*Figure 36. Photographies du pilote expérimental CycloneSep®*

### 1.1 Similitudes avec un ouvrage réel

Les dimensions du pilote ont été effectuées suivant l'espace disponible dans le hall hydraulique et la volonté de se rapprocher au maximum d'une échelle 1:1. Le pilote représente donc un ouvrage pouvant traiter les eaux de ruissellement d'un petit bassin versant. Le débit nominal de fonctionnement est de 25 l/s. Les grilles sont identiques à celles utilisées sur un ouvrage de terrain.

Contrairement à un ouvrage réel, la partie extérieure de l'ouvrage est légèrement plus haute que la partie centrale (+ 0,3 m) (*Figure 37* et *Figure 38*). Cette configuration permet de faire passer la conduite d'évacuation sous l'ouvrage dans le but d'obtenir une forme symétrique. Sur un ouvrage réel, la conduite aval traverse la partie extérieure avant de remonter vers un siphon. Dans une telle configuration, on peut considérer que le pilote consiste à étudier un ouvrage rempli à environ 60 % de déchets. Pour pouvoir vidanger l'ouvrage, la partie siphonoïde n'a pas été prise en compte.

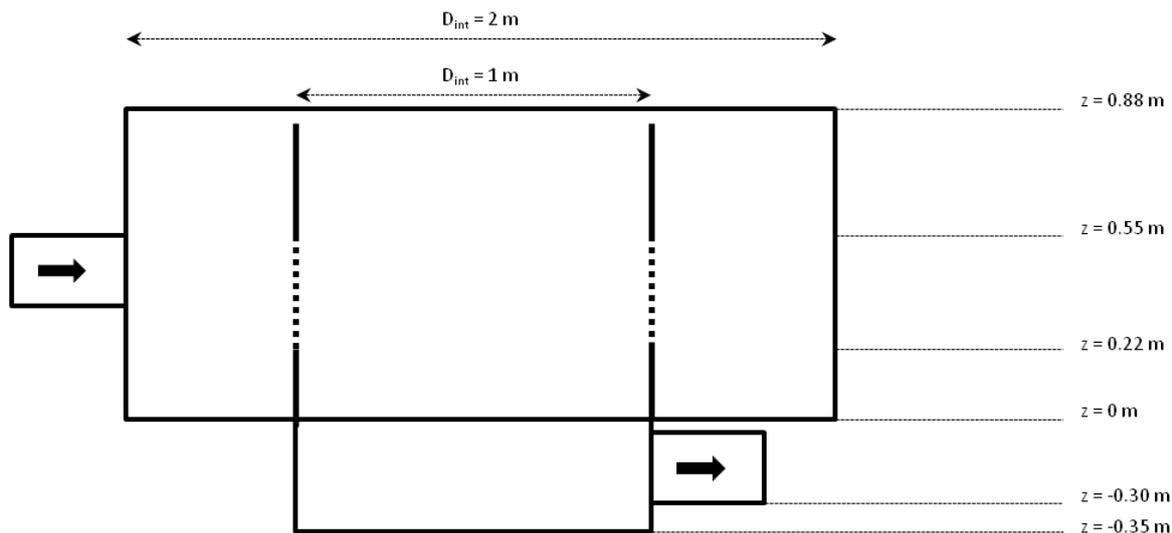


Figure 37. Schéma et dimensions du pilote expérimental

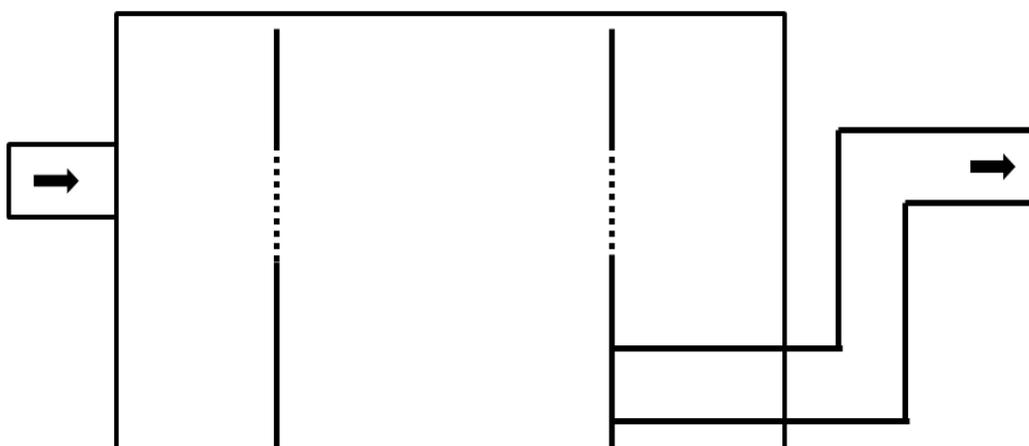


Figure 38. Représentation schématique d'un ouvrage de terrain

## 1.2 Circuit hydraulique

Le circuit hydraulique est schématisé sur la *Figure 39*. Une pompe de relevage (Flygt CP 3152), commandée depuis un automate, alimente le pilote en circuit fermé à un débit compris entre 0 et 100 l/s. Ce débit est mesuré par un débitmètre électromagnétique et piloté via un automate. Un système de purge a été installé de façon à éliminer les flux d'air présents dans le circuit. Deux vannes papillons situées en amont et en aval du bassin permettent de réguler le débit (vanne amont) et la hauteur d'eau dans l'ouvrage (vanne aval). Après la sortie du séparateur, l'eau passe par un filtre permettant de récupérer les particules avant de retourner vers le réservoir de stockage.

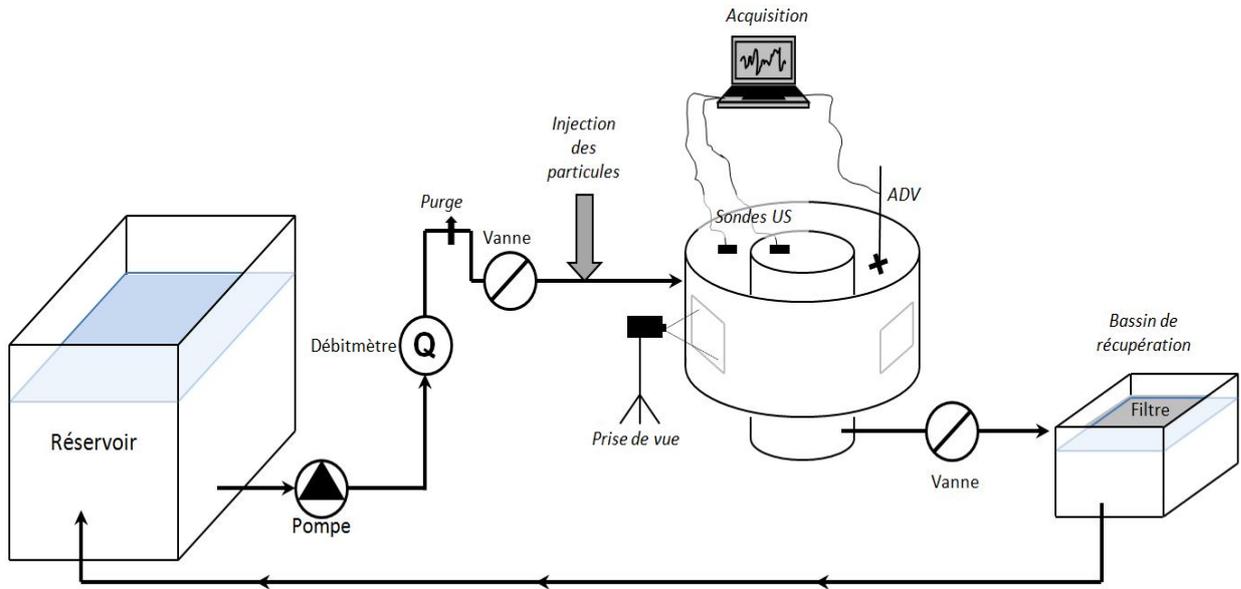


Figure 39. Schéma du dispositif expérimental

### 1.3 Configurations possibles

La partie centrale de l'ouvrage est constituée d'éléments amovibles. Nous disposons :

- d'une paroi métallique de 0,33 m de haut et de 1 m de diamètre,
- d'une paroi métallique de 0,22 m de haut et de 1 m de diamètre,
- de 3 grilles différentes.

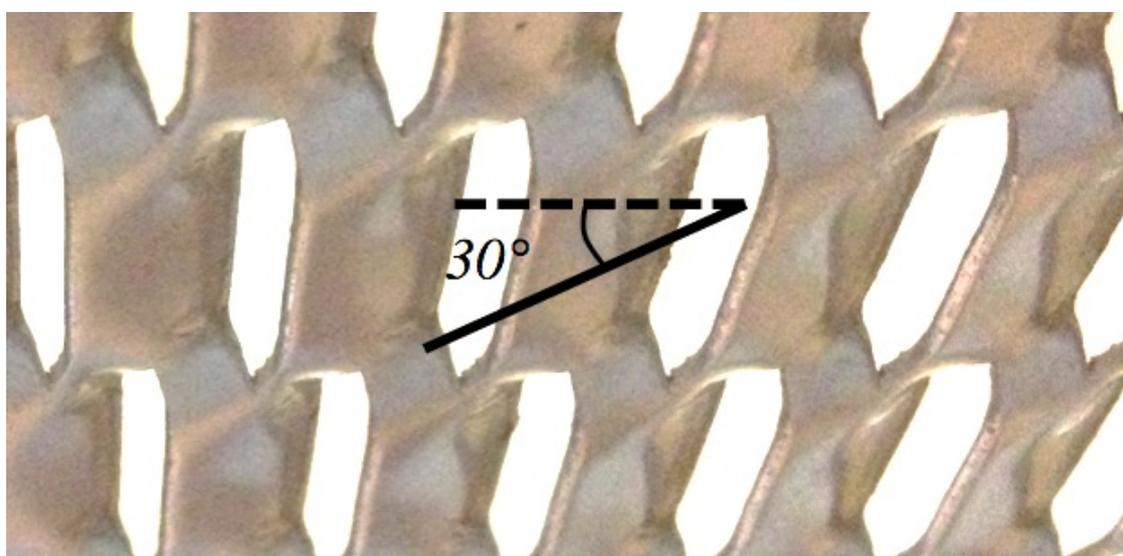
Disposition de la partie centrale	Type de grilles et dimensions
	<p>PM</p> <p>Métal déployé 30° Petites Mailles (PM) Mailles : 17 x 1.65mm Porosité de face : 0,24 Porosité max : 0,5</p>
	<p>GM</p> <p>Métal déployé 45° Grandes Mailles (GM) Mailles : 27 x 5.1mm Porosité de face : 0,48 Porosité max : 0,78</p>
	<p>PP</p> <p>Plaque perforée (PP) Mailles : 20 x 5mm Porosité : 0,44</p>

Tableau 6. Configurations de la partie centrale du pilote

Il est donc possible de tester différentes variantes au sein du même pilote en modifiant les éléments entre eux. Dans le cadre de cette thèse, l'investigation concerne essentiellement la forme de la grille et son efficacité face au colmatage et la rétention de particules. La modularité des grilles permettra également de visualiser l'influence de la grille sur l'écoulement à l'échelle globale (pertes de charges) ainsi qu'à l'échelle locale (phénomènes physiques à proximité de la grille).

Les grilles sont définies sur plusieurs critères. Le terme de porosité est ici employé pour désigner le pourcentage de vide de la grille. Il est défini dans la *Partie 1* à partir de l'équation (1).

Pour la grille de type plaque perforée, la porosité est de 0,44. En revanche pour les grilles de type métal déployé, cette variable est plus difficile à quantifier. L'inclinaison des bandelettes de métal influence la surface de passage de l'écoulement (*Figure 40*). Pour ce type de grille, la "porosité de face" consiste à prendre en compte la surface avec une vue perpendiculaire à la grille et la "porosité max" est définie à partir de la surface maximale d'ouverture.



*Figure 40. Angle d'ouverture du métal pour la grille PM*

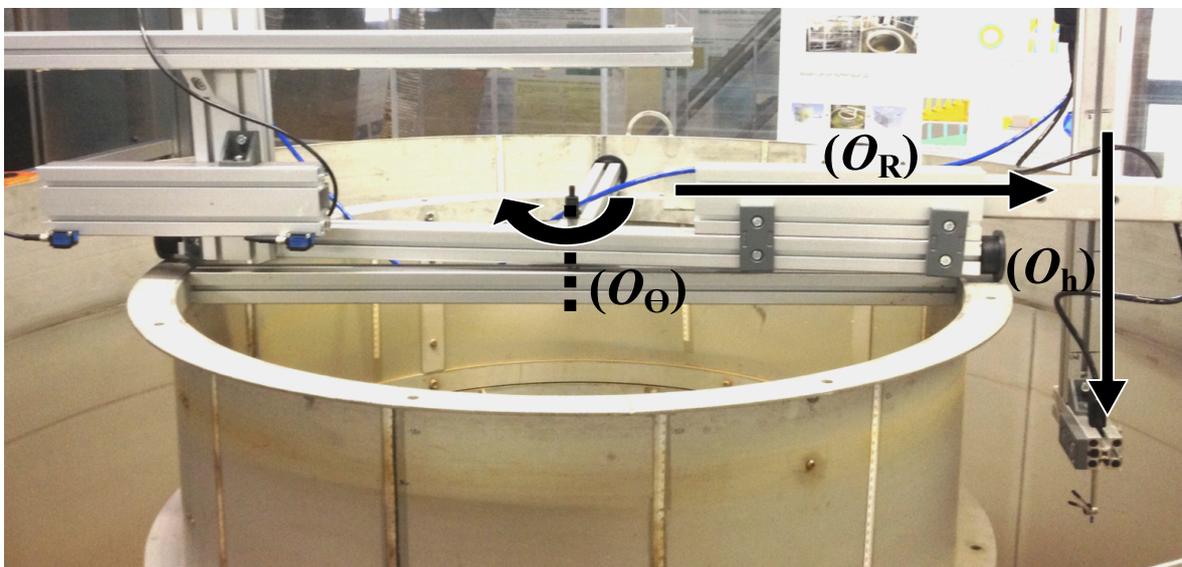
Dans l'objectif d'optimiser la forme de l'écoulement, nous disposons également de déflecteurs verticaux en inox (3 déflecteurs avec une inclinaison à 30° et 3 déflecteurs avec une inclinaison à 45° (*Figure 41*)). L'intérêt de ces déflecteurs est de tester des configurations permettant d'optimiser l'écoulement et d'augmenter l'efficacité (orienter les flux ou contrôler les zones de recirculations pour favoriser ou restreindre les dépôts). L'utilisation de déflecteurs est également intéressante dans l'objectif de tester et définir le champ d'application des modèles numériques 3D.



*Figure 41. Pilote expérimental en présence d'un déflecteur vertical sur la paroi extérieure*

#### 1.4 Banc de déplacement

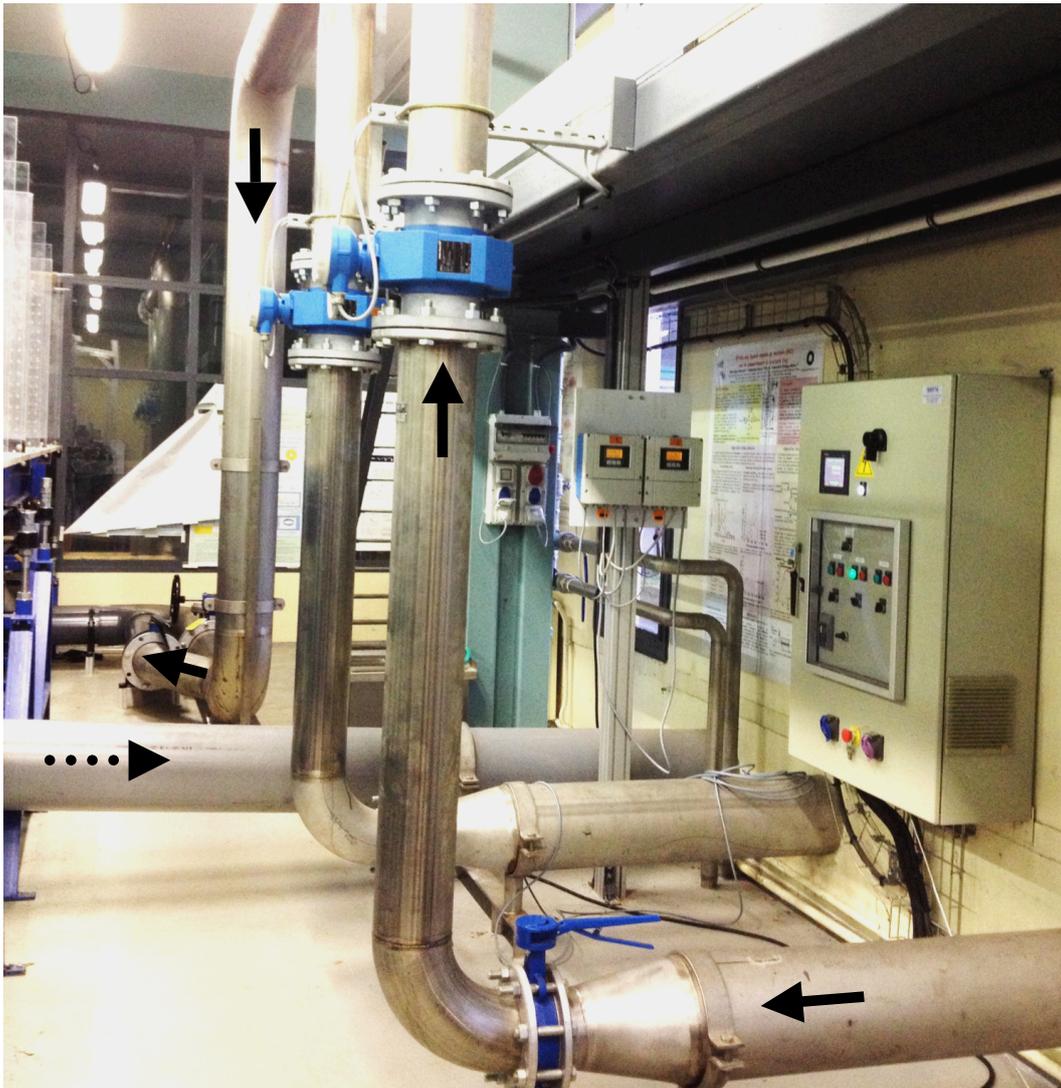
Pour mesurer les champs de vitesse et les hauteurs d'eau dans l'ensemble du pilote, un banc de déplacement 3 axes ( $O_\theta$ ,  $O_R$ ,  $O_h$ ) a été fixé sur la structure. Ce banc permet de déplacer manuellement les différentes sondes autour du pilote (Figure 42). Un système rotatif, dont l'origine correspond au centre de l'ouvrage, permet de balayer l'ensemble des angles du pilote suivant  $O_\theta$ . Un bras coulissant permet d'ajuster le rayon souhaité suivant  $O_R$ . Un second bras permet d'ajuster la profondeur de la sonde  $O_h$ .



*Figure 42. Banc de déplacement ( $O_\theta$ ,  $O_R$ ,  $O_h$ )*

## 1.5 Automate

L'intérêt d'un pilote expérimental réside dans le fait de pouvoir tester et reproduire les phénomènes dans des conditions identiques. Pour ces raisons, la métrologie est un aspect important à prendre en compte. Dans notre étude, un automate permet de gérer et contrôler l'injection du débit transitant dans le circuit hydraulique (*Figure 43*). Un programme développé sous *Labview* permet de piloter les pompes (débit constant, débit variable, tracé d'hydrogrammes, ...) et de visualiser l'ensemble des consignes et ses réponses (*Figure 44*). En résumé, en plus de reproduire et répéter un certains nombres d'expériences avec précision, l'automatisation du pilote est un moyen de contrôler le fonctionnement du système.



*Figure 43. Photographie de l'automate et du circuit hydraulique*

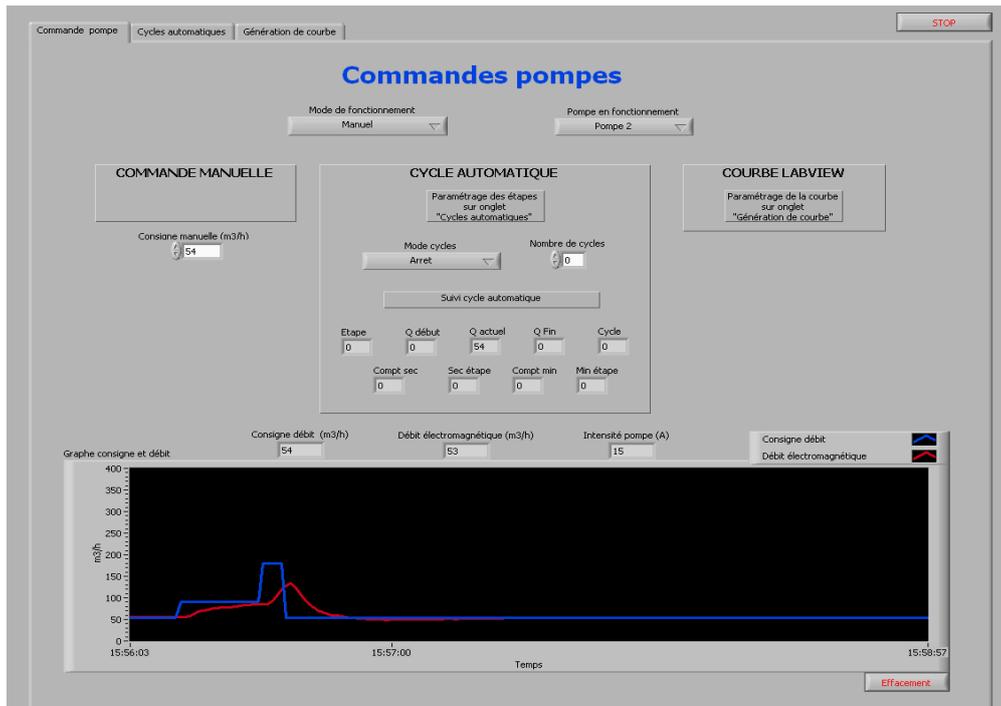


Figure 44. Poste de contrôle des pompes avec Labview

## 2. INSTRUMENTATION ET INCERTITUDES

### 2.1 Mesure des débits

Le contrôle du débit qui transite dans l'ouvrage est réalisé par un débitmètre électromagnétique (en bleu sur la Figure 43). Ce débitmètre (Promag Endress-Hauser) utilise le principe électromagnétique pour mesurer une tension induite, proportionnelle à la vitesse du fluide. Le positionnement sur la verticale permet de s'assurer de la mise en charge de la conduite. Ces conditions permettent ainsi de relier la vitesse au débit.

### 2.2 Mesure des vitesses

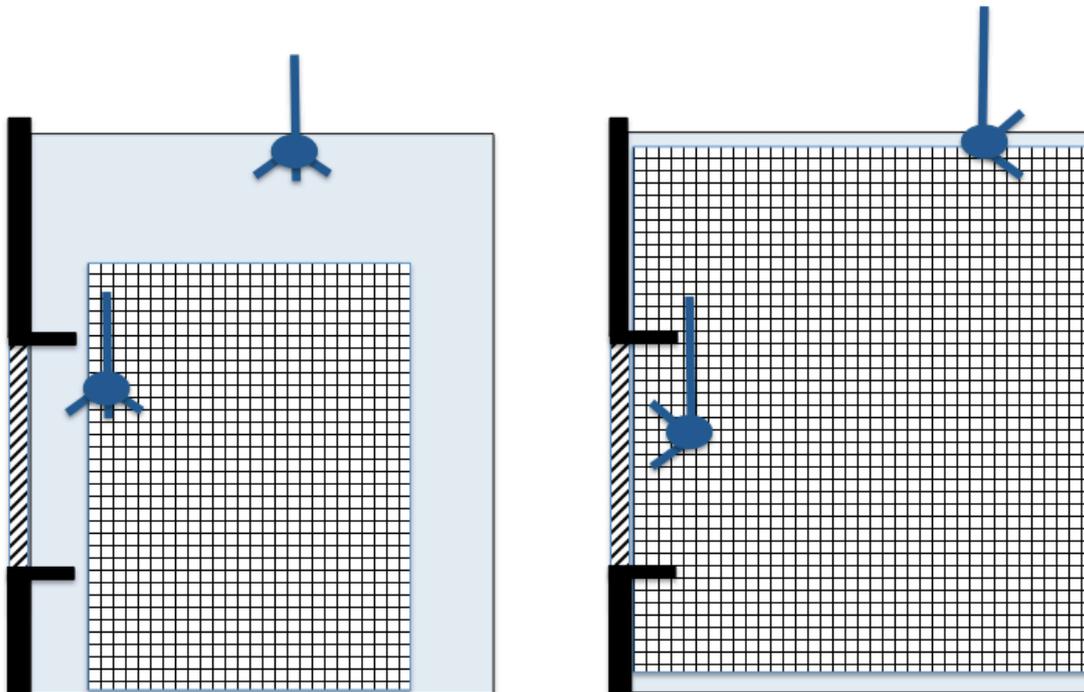
Différentes techniques sont utilisées pour mesurer des vitesses instantanées : tube de Pitot, traceurs, micromoulinet, vélocimètre à film chaud, vélocimètre Doppler laser ou vélocimètre acoustique Doppler. L'étude bibliographique nous a permis d'observer le caractère tri-dimensionnel et turbulent de l'écoulement dans les ouvrages. Dans l'objectif de mesurer ces phénomènes, nous devons choisir un instrument de mesure sophistiqué. Les méthodes les plus courantes sont la PIV (vélocimétrie par imagerie de particules) et le vélocimètre acoustique Doppler (Blanc, 2004). Ces méthodes permettent de mesurer des vitesses instantanées sans perturber la mesure (Blanc, 2004 ; Tyack & Fenner, 1999). Si la première méthode est très lourde du point de vue de la mise en place (calage d'une mire, norme

de sécurité du site) et du traitement de données, la seconde l'est moins. Le choix s'est donc porté sur un vélocimètre acoustique Doppler (ADV).

Nous avons à notre disposition deux ADV :

- ADV Sontek 3 branches "down-looking" - 50Hz (Sontek, 2001)
- ADV Nortek 4 branches "side-looking" - 25Hz (Vectrino, 2009)

L'utilisation des deux ADV se justifie par leur complémentarité et notre volonté à accéder à des zones bien spécifiques (proche des parois et de la grille). En position "down-looking", l'ADV mesure ponctuellement les trois composantes de la vitesse ( $V_t$ ,  $V_r$  et  $V_z$ ) dans un volume de  $1 \text{ cm}^3$  et situé 5 cm sous l'émetteur du capteur. Dans cette configuration, nous n'avons pas accès à des mesures proches des parois, de la surface libre et surtout à proximité de la grille (à gauche de la *Figure 45*). L'association avec un ADV "side-looking" permet, grâce à l'orientation du tripode, de compléter la surface de mesure et donc le profil de vitesse (à droite de la *Figure 45*).



**Figure 45. Possibilités d'acquisition en fonction de l'orientation et de la position de l'ADV**

Le capteur (*Figure 46*) est placé sur le banc de déplacement comme indiqué sur la *Figure 42* afin de cartographier l'ensemble du pilote. Le logiciel d'acquisition *VectrinoPlus* (2009) nous informe de la position du capteur par rapport à la paroi. Cette information permet de régler la tête du capteur avec précision ( $\pm 1 \text{ mm}$ ).

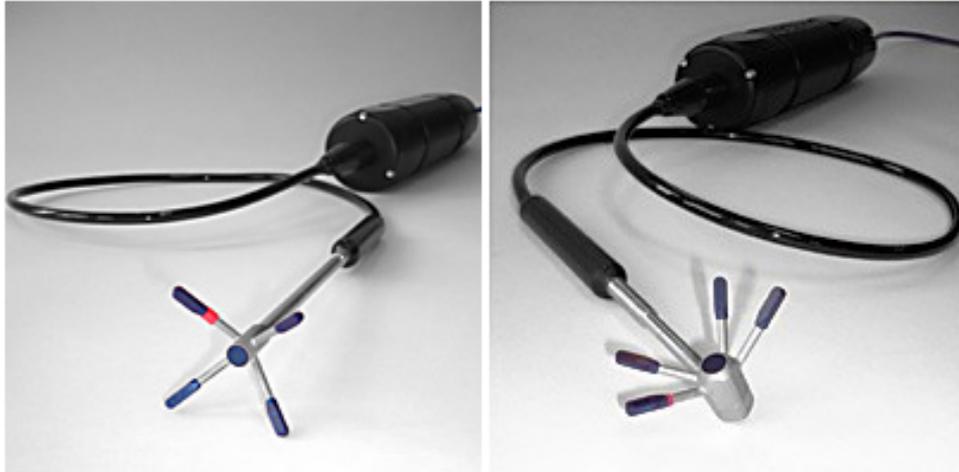


Figure 46. ADV en configuration "down-looking" (à gauche) et "side-looking" (à droite)

L'avantage d'un ADV est très certainement qu'il ne nécessite aucun étalonnage. Cependant, il faut être minutieux sur les différents réglages pour l'acquisition. Il faut en premier lieu déterminer la bonne gamme de mesure de l'appareil (Blanc, 2004 ; Dufresne, 2008). Une gamme trop petite va entraîner des pics anormaux et une gamme trop grande des imprécisions de mesures. La période d'échantillonnage est également à prendre en compte (Strom et al., 2008). Une première expérience a permis de fixer la période d'échantillonnage à 20 secondes. En dessous de cette valeur, la vitesse moyenne n'est pas constante.

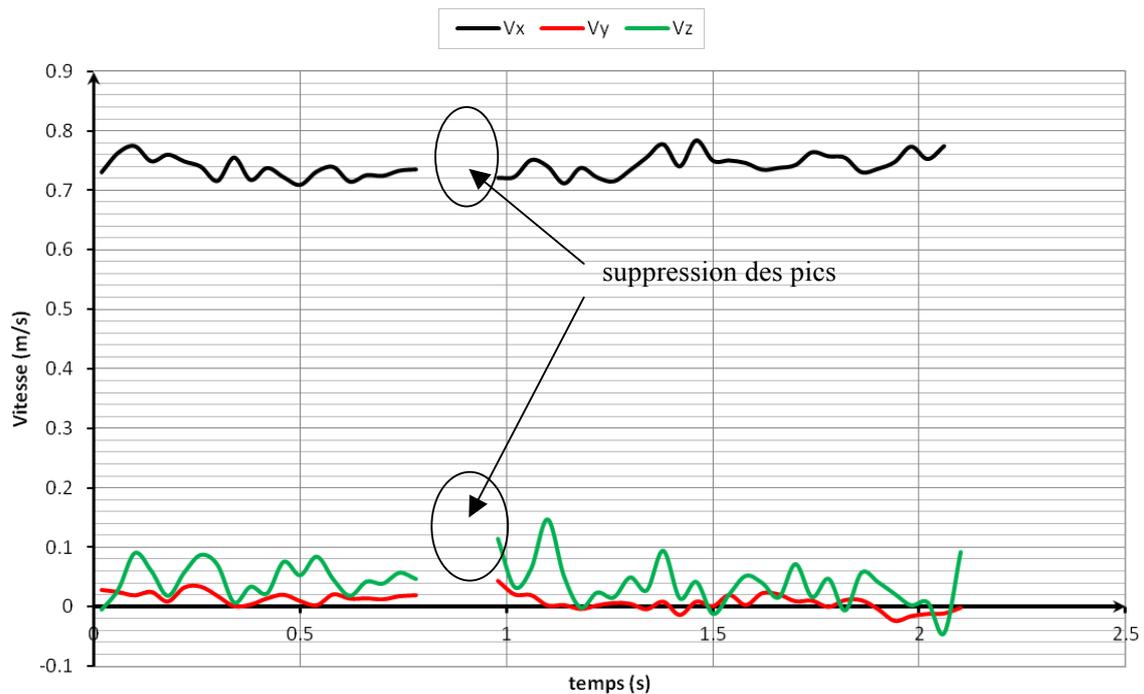


Figure 47. Exemple de mesure ADV après l'utilisation du filtre

Le logiciel de traitement *WinADV* est ensuite utilisé pour filtrer les données et supprimer les pics anormaux (*Figure 47*). Nous avons utilisé le *phase-space threshold despiking* pour filtrer nos données (Sontek, 2001; Goring & Nikora, 2002). Ce filtre a l'avantage de ne pas perturber le calcul de la vitesse moyenne, même en supprimant 10% des mesures brutes (Dufresne, 2008).

### 2.3 Mesure de la turbulence

La turbulence est un aspect important à prendre en compte dans notre étude, notamment pour la validation du modèle numérique. Les zones à proximité de la grille seront donc étudiées afin de mettre en évidence les phénomènes locaux. Si les techniques de mesures "habituelles" ne sont pas utilisées dans notre cas (LDA, PIV,...), l'ADV permet de mesurer les fluctuations de vitesses grâce à sa fréquence d'acquisition élevée (respectivement 50 Hz et 25 Hz pour le Sontek et le Nortek).

Les vitesses fluctuantes permettront de déterminer l'énergie cinétique turbulente  $k$  (équation 5).

$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'} \right) \quad (5)$$

avec  $u'$ ,  $v'$  et  $w'$  les fluctuations des vitesses suivant les axes  $O_\theta$ ,  $O_R$ , et  $O_h$ .

En revanche, le taux de dissipation de l'énergie cinétique  $\varepsilon$  ne peut pas être calculé suivant l'hypothèse classique de Taylor. En effet, l'hypothèse de Taylor est applicable dans les cas où l'écoulement est principalement unidimensionnel (Blanc, 2004), ce qui n'est pas le cas dans notre ouvrage, principalement à proximité de la grille, où l'écoulement est fortement tridimensionnel.

La période d'échantillonnage nécessaire à la mesure de la turbulence diffère de celle utilisée pour la mesure des vitesses. Il est en effet nécessaire de réaliser une acquisition pendant 5 minutes (Strom et al., 2008).

### 2.4 Mesure de la surface libre

La mesure de la surface libre est une également une variable importante à prendre en compte. Non seulement elle est nécessaire au calcul des pertes de charge, mais en plus, elle sera déterminante pour le choix et la validation du modèle numérique.

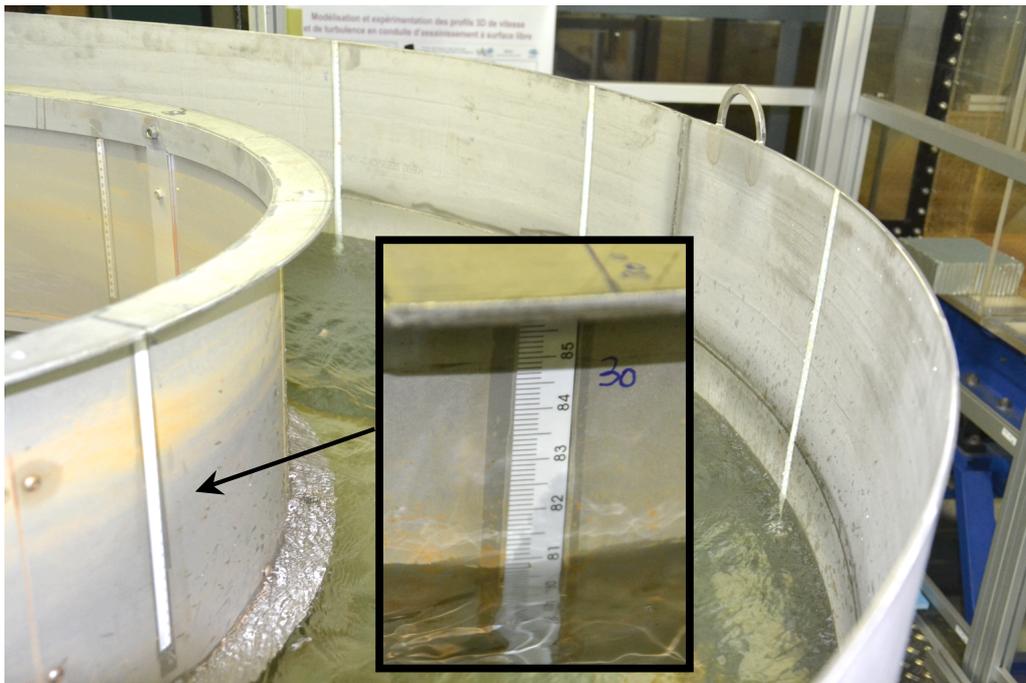
La mesure de la surface libre est réalisée à l'aide de deux méthodes. Une première méthode dite "classique" consiste à observer le niveau d'eau à l'aide de limnimètres à ruban disposé autour de la paroi centrale tous les 30° (*Figure 48*). La seconde méthode permet quant à elle d'enregistrer l'évolution de la hauteur d'eau à l'aide de deux capteurs ultrasons (*Figure 49*). Ces capteurs (*Microsonic zws-24*) ont la possibilité de déterminer la position de la surface libre à une distance

comprise entre 5 et 240 mm du capteur (*Figure 51*). La technique consiste à intercepter la surface de l'eau dans le cercle issu du cône de mesure. Connaissant la distance capteur/surface libre, on peut déterminer la hauteur d'eau au sein de l'ouvrage.

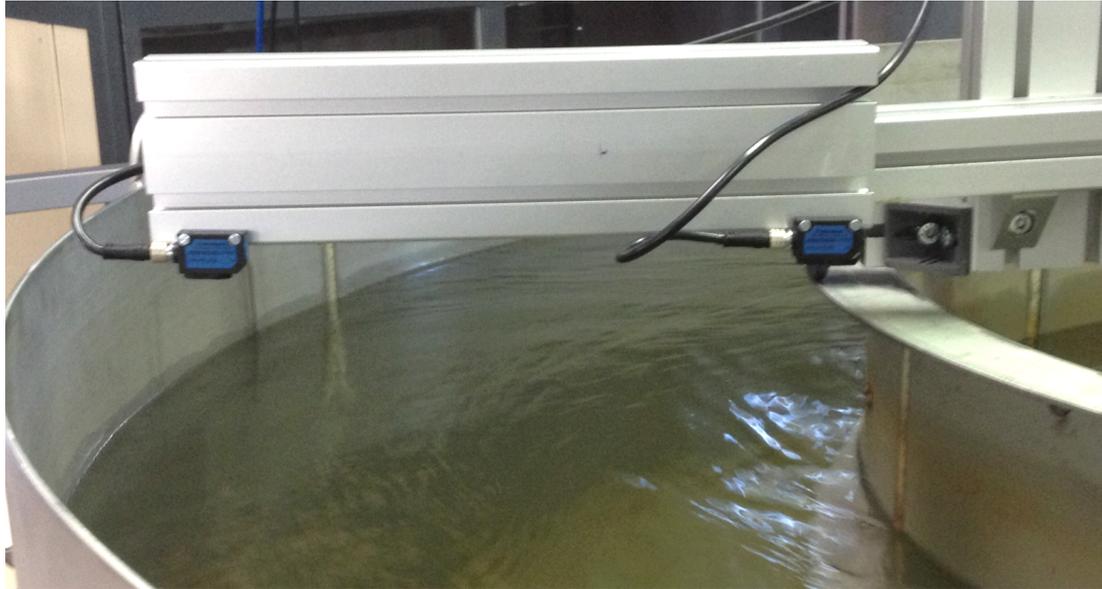
D'un point de vue métrologique, la résolution des sondes est de 0,2 mm et la fréquence du transducteur de 500 kHz (Microsonic, 2012), ce qui permet de mesurer la surface libre à hautes fréquences avec une très bonne précision.

L'alimentation des sondes est réalisée à l'aide d'un générateur 0-20V et l'installation d'une carte d'acquisition *National Instrument* permet de piloter les deux capteurs en simultanément. Le développement d'un programme sous *Labview* permet de programmer l'acquisition (fréquence d'échantillonnage, loi d'étalonnage,...) et d'enregistrer les mesures de hauteurs (*Figure 50*).

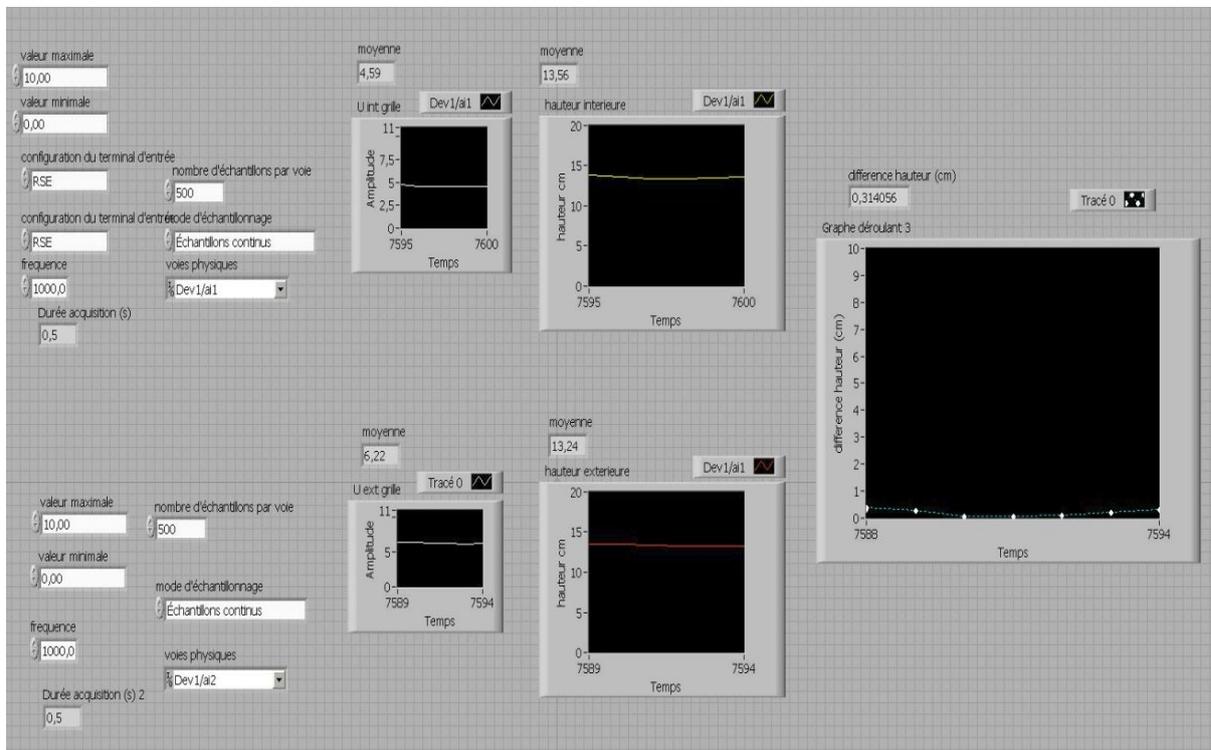
L'inconvénient de cette méthode est qu'elle requiert un étalonnage après chaque déplacement des sondes. En effet, les méthodes de mesure par ultrasons permettent de détecter le niveau d'eau en mesurant le temps mis par l'écho de l'onde transmise par le capteur à revenir vers lui. Cette technique permet de mesurer la distance de vide entre le capteur et la surface mais nécessite de connaître la distance entre le capteur et le fond, afin de calculer la hauteur d'eau. Le processus d'étalonnage que requièrent ces sondes est la raison pour laquelle nous ne réaliserons pas de cartographies complètes des hauteurs d'eau à l'aide de ces instruments.



**Figure 48. Mesures des hauteurs d'eau à l'aide de mètres linéaires**



**Figure 49. Mesures des hauteurs d'eau à l'aide de capteur US**



**Figure 50. Acquisition des hauteurs d'eau sous Labview**

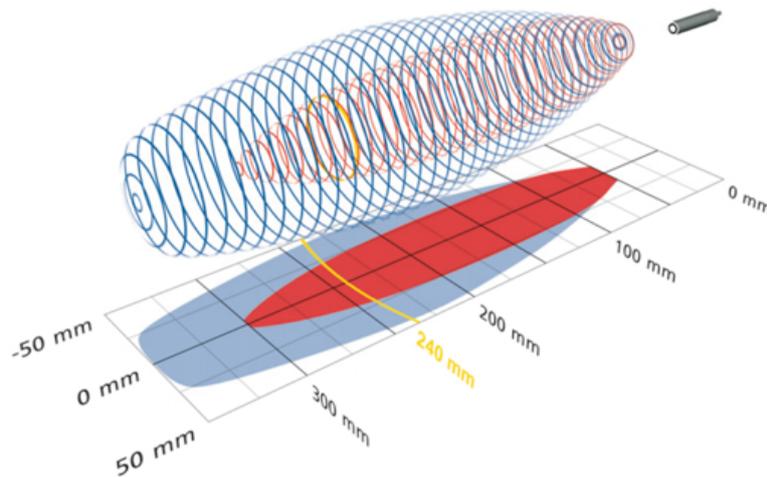


Figure 51. Cône de mesure du capteur US (Microsonic, 2012)

## 2.5 Incertitudes de mesures

Cette partie regroupe les différents calculs d'incertitudes associés aux instruments de mesure.

L'incertitude  $u_{vitesse}$  sur la mesure des vitesses est tirée des données constructeurs :

- +/- 0,5 % de la vitesse mesurée pour l'ADV Nortek
- +/- 1 % de la vitesse mesurée pour l'ADV Sontek

L'incertitude sur les débits entrants dans l'ouvrage est de 0,2% de la mesure (Endress Hauser, 2006). De plus, la mesure des débits via l'automate permet d'observer les oscillations du débit. Ces fluctuations ne dépassent jamais 0,1 l/s.

Concernant les hauteurs d'eau, les incertitudes sont de 0,2 mm pour les sondes US (Microsonic, 2012) et l'erreur de lecture sur les mètres linéaires est de +/- 1 mm.

Le *Tableau 7* résume l'ensemble des capteurs et leurs incertitudes.

Capteurs	Incertitude
ADV Nortek	+/- 0,5 % de la mesure (en m/s)
ADV Sontek	+/- 1 % de la mesure (en m/s)
Débitmètre électromagnétique	+/- 0,2 % de la mesure (en l/s)
Oscillations automate	+/- 0,1 l/s
Capteur US Microsonic	+/- 0,2 mm
Limnimètre à ruban	+/- 1mm

Tableau 7. Capteurs et incertitudes

Un autre point à souligner concerne les oscillations de la surface libre. En effet, nous avons constaté la présence de fluctuations notamment au niveau de la partie centrale. Afin de prendre en compte l'incertitude liée à ce phénomène, nous avons observé ces battements pour différents débits. L'amplitude mesurée en fonction du débit permet d'estimer l'incertitude liée aux oscillations.

L'incertitude liée au battement de la surface libre est estimée à partir de l'amplitude  $A_{oscillation}$  des oscillations de la façon suivante :

$$u_{oscillation} = \pm \frac{A_{oscillation}}{2} \quad (6)$$

L'amplitude et la position des battements diffèrent en fonction du débit. Plus les débits seront faibles, plus les oscillations seront faibles. Au contraire, on observe de fortes fluctuations pour des débits importants. La *Figure 52* montre les différents battements observés. Les incertitudes sur les oscillations associées à chaque débit figurent dans le *Tableau 8*.

Débit (l/s)	Amplitude (mm)	Incertitude (mm)
15	1	+/- 0,5
25	5	+/- 2,5
50	25	+/- 12,5

*Tableau 8. Incertitudes sur les mesures instantanées de hauteur d'eau*



*Figure 52. Oscillations de la surface libre pour un débit de 50 l/s*

## 2.6 Reproductibilité et répétabilité des expériences

L'automatisation du dispositif permet *a priori* de respecter des conditions de reproductibilité. En d'autres termes, cela signifie qu'en régime permanent, et pour les mêmes conditions amont et aval, l'écoulement au sein du pilote est répétable.

Différents tests ont été effectués pour s'assurer de la répétabilité et la reproductibilité des expériences. Un premier test a consisté à observer les niveaux d'eau ainsi que la répétabilité des mesures de vitesses entre deux expériences successives. Un second test a permis de mettre en évidence la bonne reproductibilité des mesures de vitesses entre les deux capteurs ADV. La comparaison des vélocimètres est disponible en *Annexe A*.

### **3. TRANSPORT SOLIDE**

Il est important de dissocier les différents objectifs en termes de transport solide dans le cadre de cette thèse. Si le rôle principal de l'ouvrage est de retenir les macro-déchets, nous avons constaté que les séparateurs hydrodynamiques avaient une certaine aptitude à retenir des MES. Par conséquent, l'étude du transport solide consiste à étudier le comportement de l'ouvrage vis-à-vis des macro-déchets, mais aussi à tester la capacité de l'ouvrage à retenir des fines particules.

#### **3.1 Expériences avec des macro-déchets**

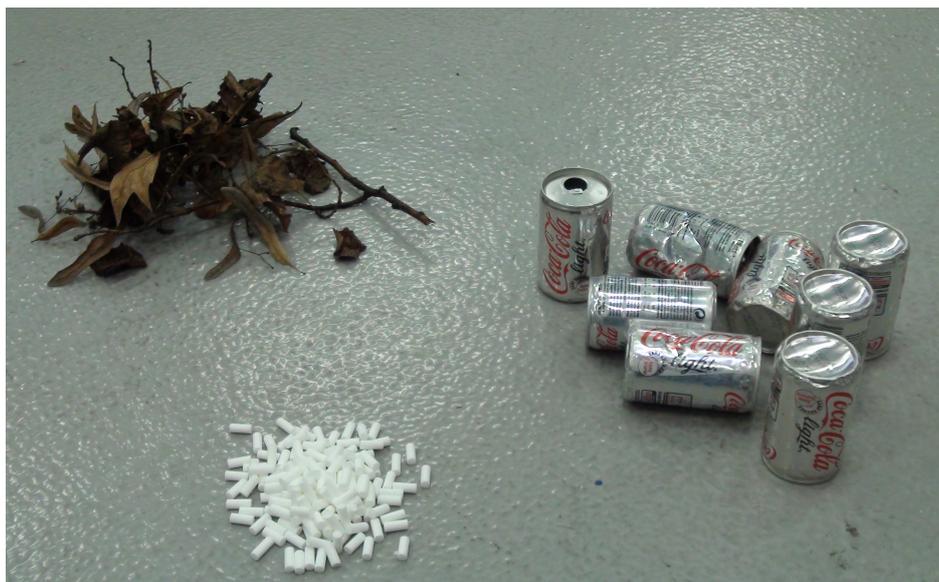
Deux types d'expériences sont rapportés dans l'étude du comportement des macro-déchets :

- des essais essentiellement qualitatifs ayant pour objectif de visualiser le fonctionnement de l'ouvrage vis-à-vis de différents types de macro-déchets
- des tests consistant à évaluer l'aptitude des grilles face au colmatage

#### **Description des macro-déchets**

Dans la littérature, on désigne par "macro-déchets" l'ensemble des polluants d'une taille supérieure à 2cm. Le choix des macro-déchets s'est porté sur :

- des canettes de soda,
- des bouchons plastiques,
- des fragments de plastiques,
- des filtres de cigarettes,
- des feuilles d'arbres et de papier,
- des lingettes,
- des sachets plastiques.



*Figure 53. Exemple de macro-déchets testés dans le pilote expérimental*

### 3.2 Expériences avec des MES

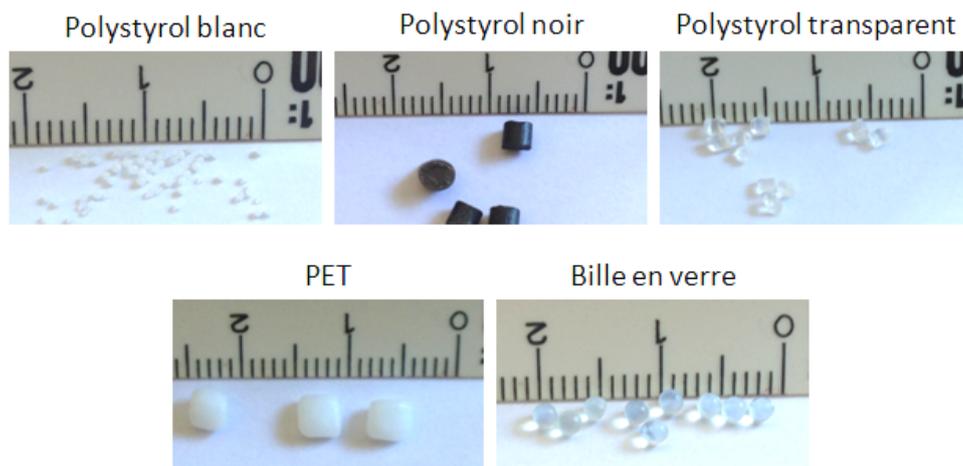
#### Description des particules

Le pilote étant dimensionné à l'échelle 1:1, nous devons utiliser des particules à cette échelle. Nous avons donc utilisé des particules du laboratoire pouvant se rapprocher au plus près de celles retrouvées en réseau d'assainissement.

Les particules testées sont visibles sur la *Figure 54*. Des particules de polystyrol permettront d'étudier des particules de très faible masse volumique (*Tableau 9*). D'autres particules sont également testées comme des billes en verre ou des particules de polytéréphtalate d'éthylène (PET). Les caractéristiques de ces particules sont rapportées dans le *Tableau 9*. On constate que les diamètres sont nettement plus importants que ceux retrouvés en réseau, mais le fait d'avoir une grande variété de particules est très intéressante pour comparer l'influence de ces paramètres avec la modélisation du transport solide.

Particules	Diamètre médian ( $\mu\text{m}$ )	Masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Forme
Polystyrol blanc	738	1034	sphérique
Polystyrol noir	2500	1080	cylindrique
Polystyrol transparent	1500	1060	cylindrique
PET	2500	1296	x
Billes en verre	2000	2556	sphérique

*Tableau 9. Caractéristiques des particules utilisées pour les expériences de transport solide*



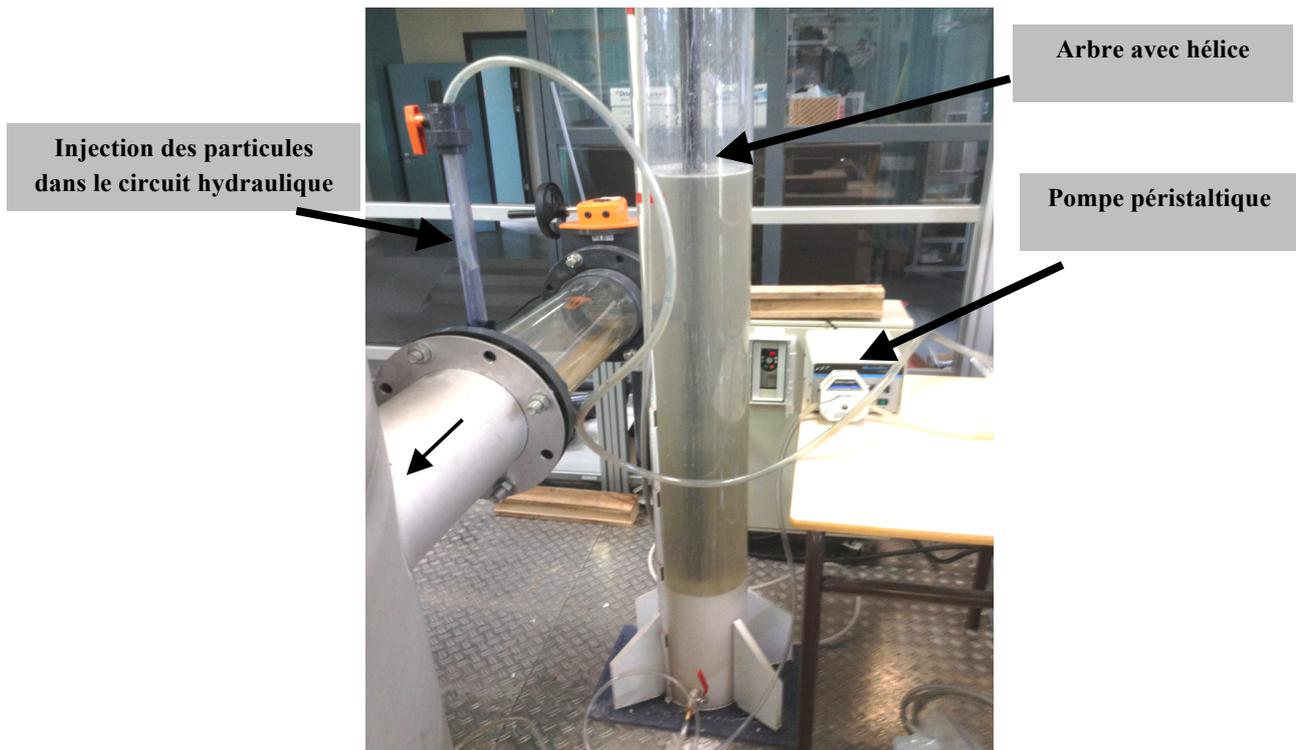
**Figure 54. Photographies des particules utilisées pour les expériences de transport solide.**

### **Dispositif d'injection et de récupération des particules**

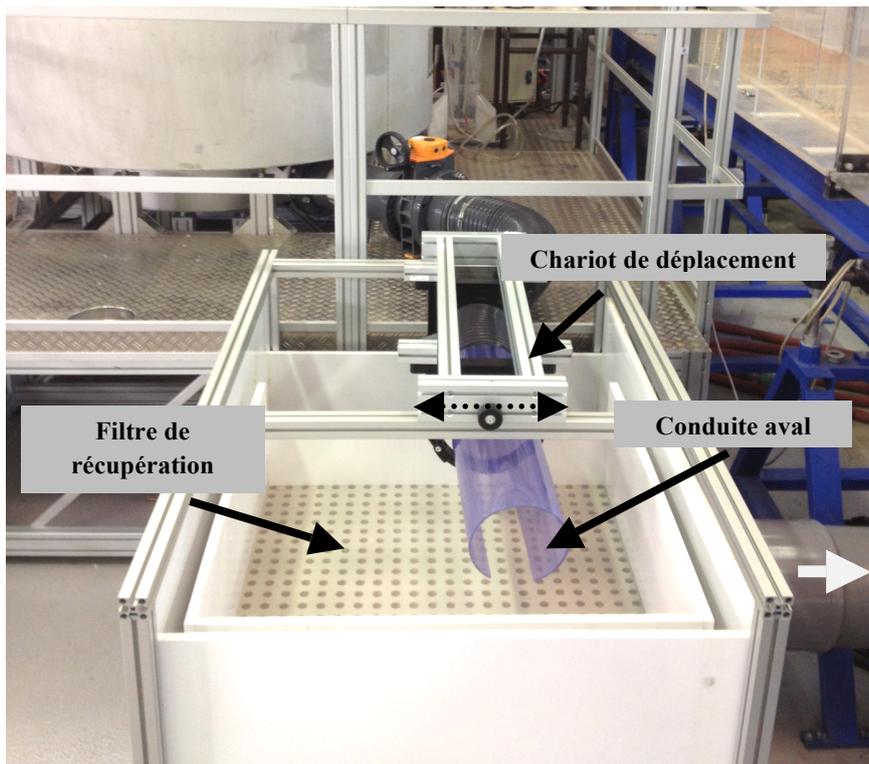
Les particules sont stockées dans une colonne de diamètre 30 cm et de hauteur 200 cm (*Figure 55*). L'ajout d'un volume d'eau permet d'ajuster la concentration injectée dans le pilote. Un dispositif d'agitation, constitué d'un arbre et d'une hélice, permet d'homogénéiser le mélange eau/particules présent dans la colonne.

Le mélange est ensuite prélevé depuis la base de la colonne, puis injecté dans la conduite d'entrée du pilote à l'aide d'une pompe péristaltique à débit réglable (*Figure 55*). Des tests ont permis de vérifier que la concentration était homogène sur la hauteur de la colonne.

La récupération des particules s'effectue au moyen d'un dispositif de filtration situé à la sortie du pilote (*Figure 56*). Le tamis permettant la filtration permet de récupérer des particules d'un diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$ . Un chariot de déplacement a également été conçu dans l'objectif de compartimenter le filtre et donc de visualiser l'évolution de l'efficacité de l'ouvrage au cours du temps.



*Figure 55. Dispositif d'injection des particules dans le pilote  
(l'agitation n'est pas effectuée lors de la prise de vue)*



*Figure 56. Dispositif de récupération des particules dans le pilote*

## II. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

### 1. A L'ECHELLE DE L'OUVRAGE

Pour caractériser l'écoulement dans l'ouvrage, une campagne de 240 mesures a été réalisée pour cartographier les champs de vitesses pour un même débit. Le pilote a été échantillonné suivant 4 plans horizontaux et 12 plans verticaux (*Figure 57*). Les plans verticaux permettent de suivre les grandeurs physiques en fonction de la rotation de la colonne d'eau avec un pas de  $30^\circ$ . Le plan  $0^\circ$  correspond au plan perpendiculaire à la conduite d'entrée. Les plans horizontaux permettent quant à eux d'observer l'écoulement à différentes hauteurs dans le pilote : près du fond (11 cm), sous la grille (22 cm), au milieu de la grille (38 cm) et sous la surface libre (55 cm).

Au cours des expériences, la hauteur de la surface libre est fixée à 70 cm. L'ensemble des expériences sont réalisées en régime permanent. Les mesures de vitesses ont été réalisées avec l'ADV *Sontek* en configuration *down-looking*. Une interpolation des mesures à l'aide du logiciel *Matlab*<sup>®</sup> a permis de reconstruire les différents plans. Notons également que seule la partie extérieure de la grille est étudiée.

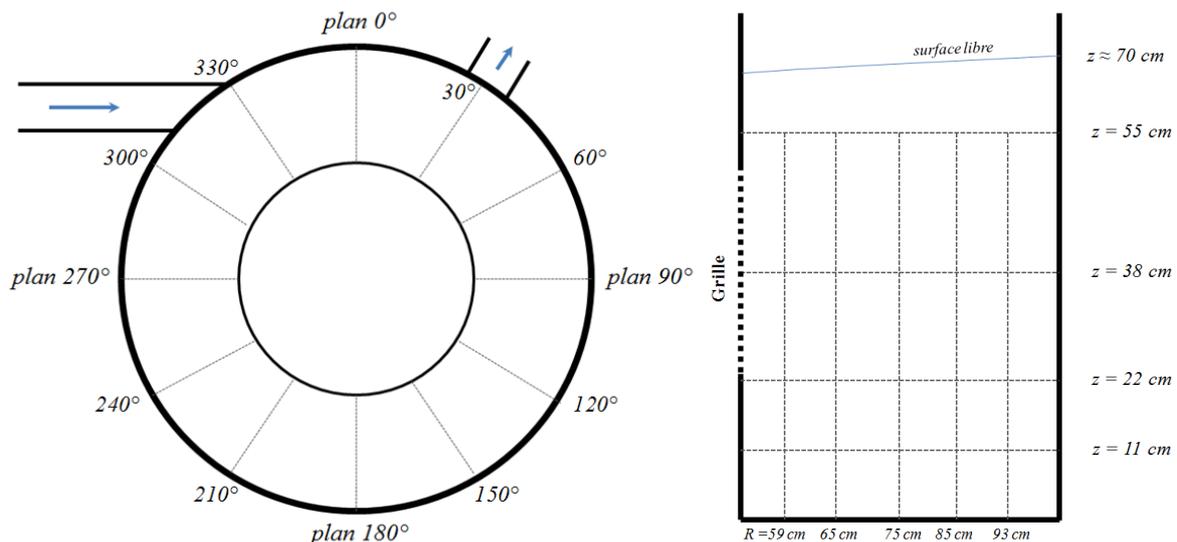


Figure 57. Disposition des plans verticaux (à gauche) et échantillonnage d'un plan (à droite)

#### 1.1 Vitesse

##### Analyse des vitesses pour le débit nominal (25 l/s)

Les champs de vitesses correspondant au débit nominal pour la grille "petites mailles" sont visibles sur les figures ci-dessous. Les profils horizontaux (*Figure 58*) permettent d'observer que les vitesses les plus grandes (environ 0,75 m/s) se situent au niveau de la partie centrale. A contrario, les plus faibles vitesses (environ 0,5 m/s) se situent au niveau des parois extérieures.

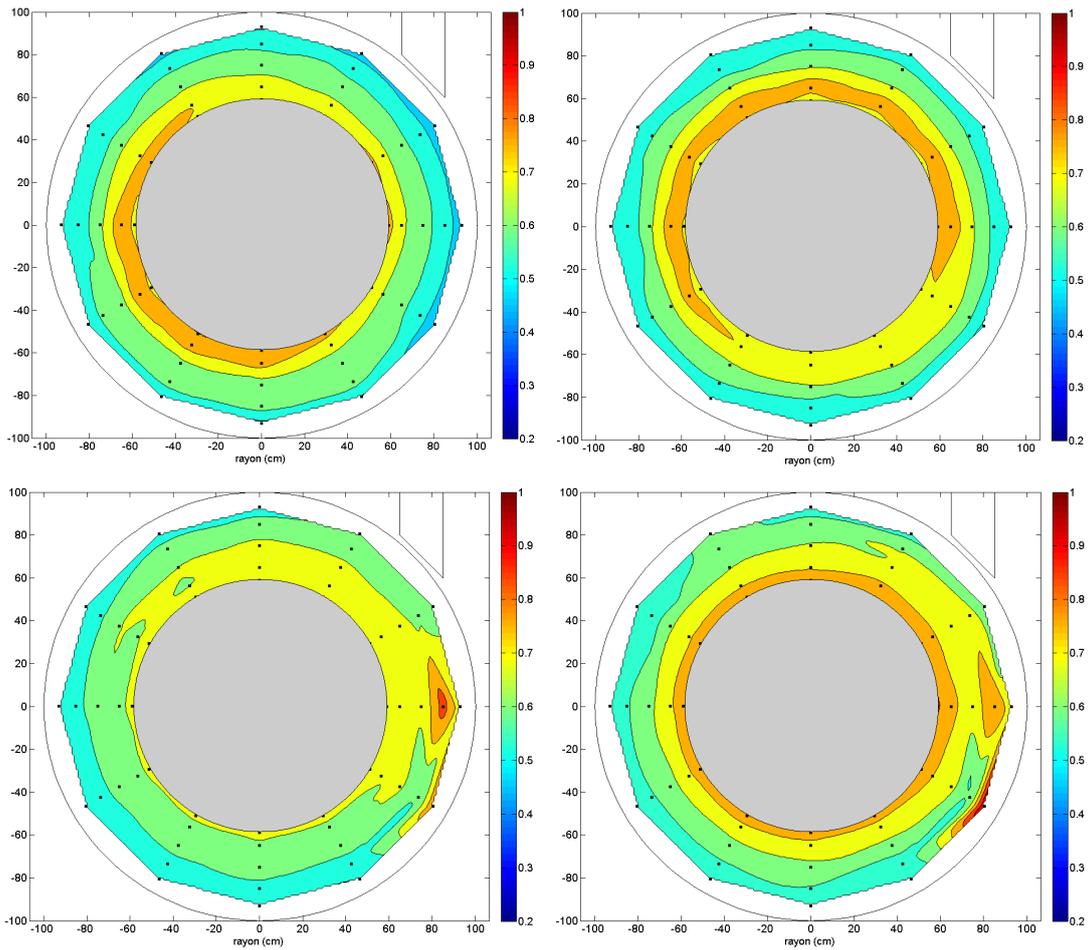


Figure 58. Champs de vitesse normale pour un débit de 25 l/s

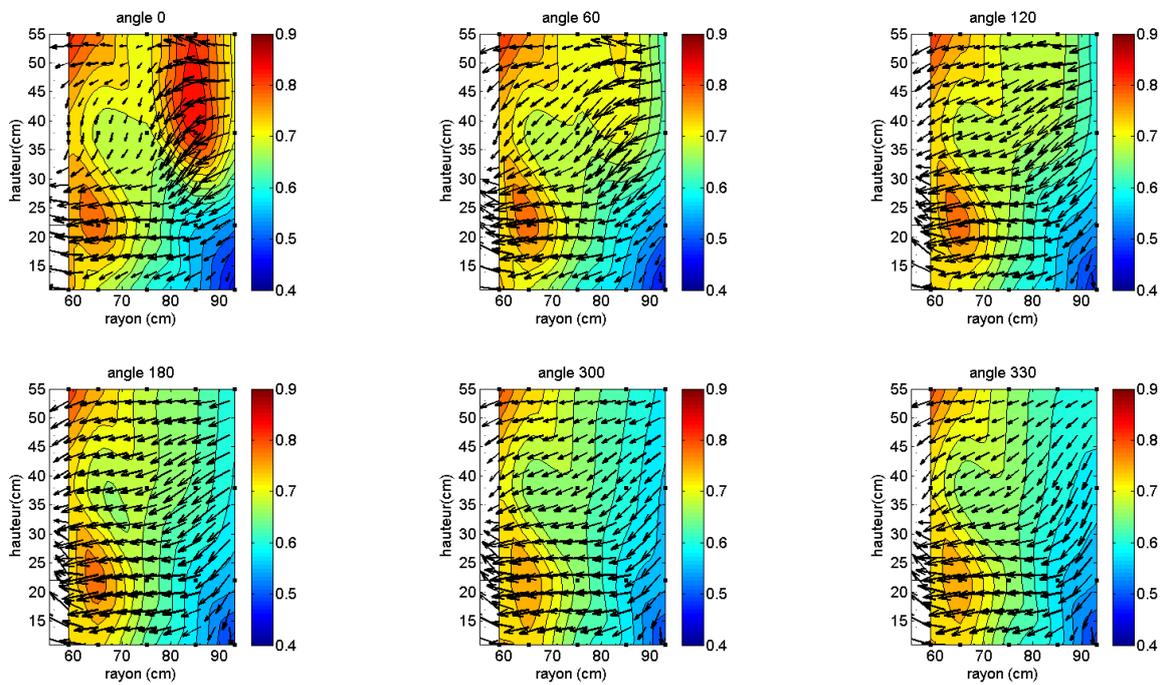


Figure 59. Champs de vitesse tangentielle et courants secondaires pour un débit de 25 l/s

Les profils verticaux permettent quant à eux d'observer l'évolution du champ de vitesse tangentielle ainsi que les courants secondaires en fonction de la position du plan autour de la grille. On observe à travers la *Figure 59* une certaine homogénéité des vitesses sur l'ensemble des plans. Le plan 0° permet de distinguer l'entrée du fluide dans l'ouvrage.

### **Influence du débit dans l'ouvrage**

Deux autres débits ont été étudiés au sein du pilote pour visualiser l'influence du débit d'entrée sur le champ de vitesse dans l'ouvrage :

- 15 l/s (soit 60% de débit nominal)
- 50 l/s (soit 200% du débit nominal)

Pour un débit d'entrée de 15 l/s, on observe une forte variabilité sur la verticale : on a de faibles vitesses au niveau du fond et de fortes vitesses vers la surface libre. Nous pouvons faire l'hypothèse qu'à petit débit, la vitesse en entrée est trop faible pour mettre en mouvement de façon conséquente l'ensemble de la colonne d'eau. On remarque également que les courants secondaires ne sont pas homogènes. Au fond, ces courants sont orientés vers la paroi extérieure et dans la partie haute vers la grille.

Pour un débit de 50 l/s, les profils ressemblent à ceux observés pour 25 l/s. Les vitesses sont très élevées à proximité de la grille et les vitesses au niveau du fond deviennent plus importantes même s'il existe toujours un gradient conséquent de vitesse sur la verticale. On observe également que la direction principale des courants secondaires est homogène et en direction de la grille.

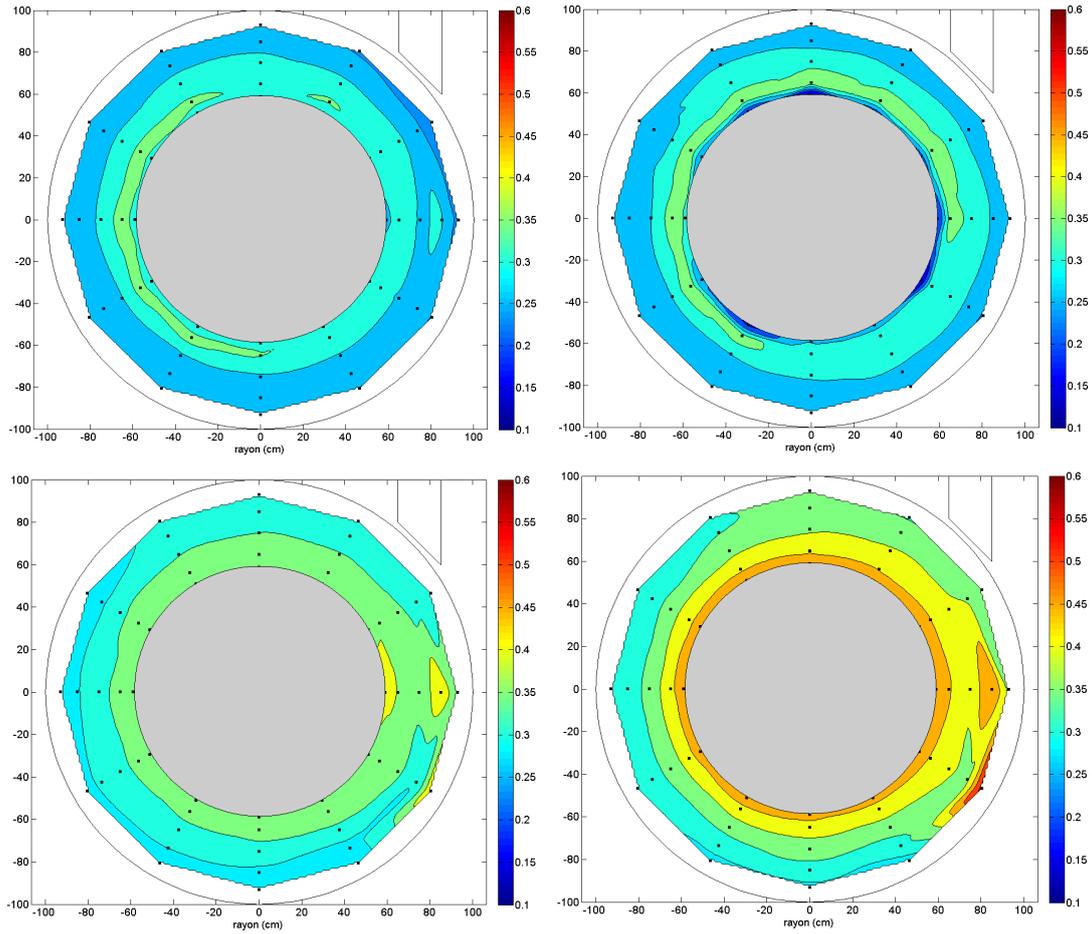


Figure 60. Champs de vitesse normale pour un débit de 15 l/s

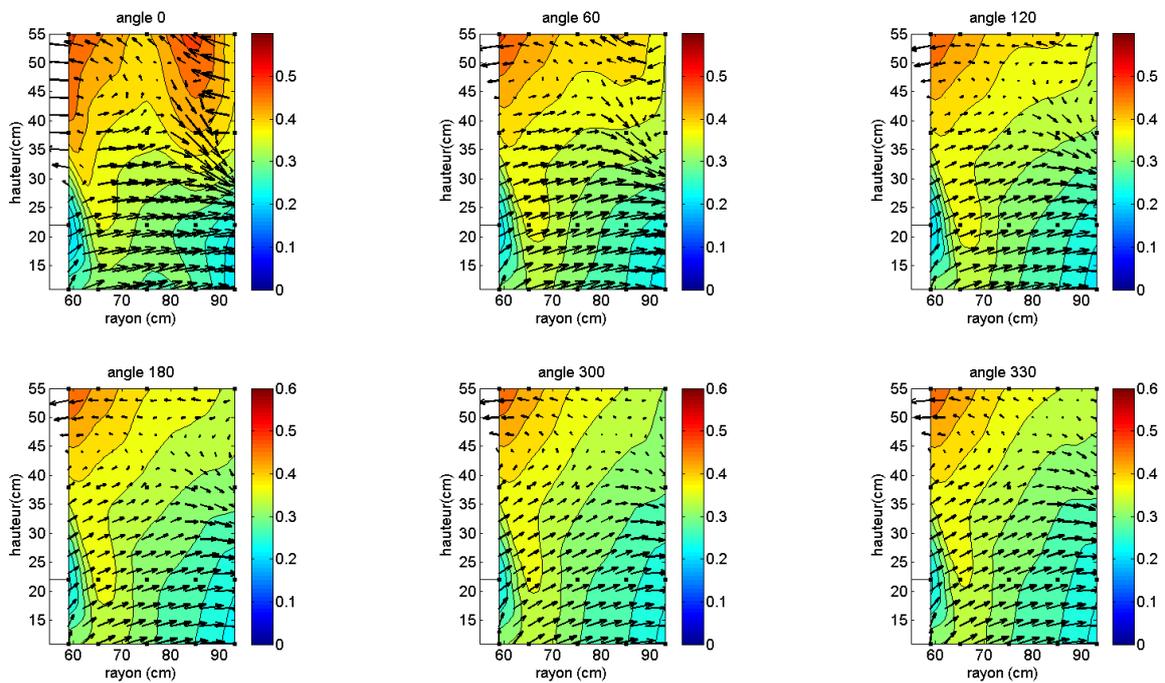


Figure 61. Champs de vitesse tangentielle et courants secondaires pour un débit de 15 l/s

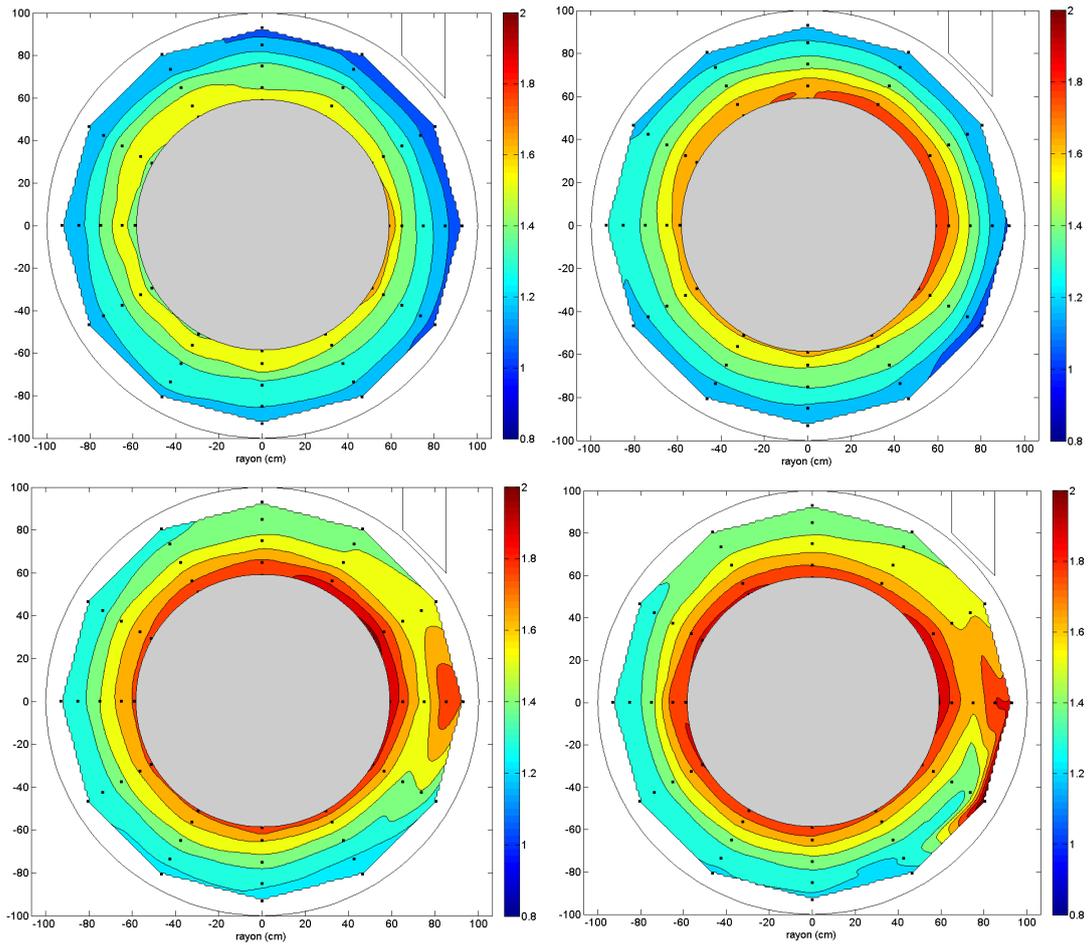


Figure 62. Champs de vitesse normale pour un débit de 50 l/s

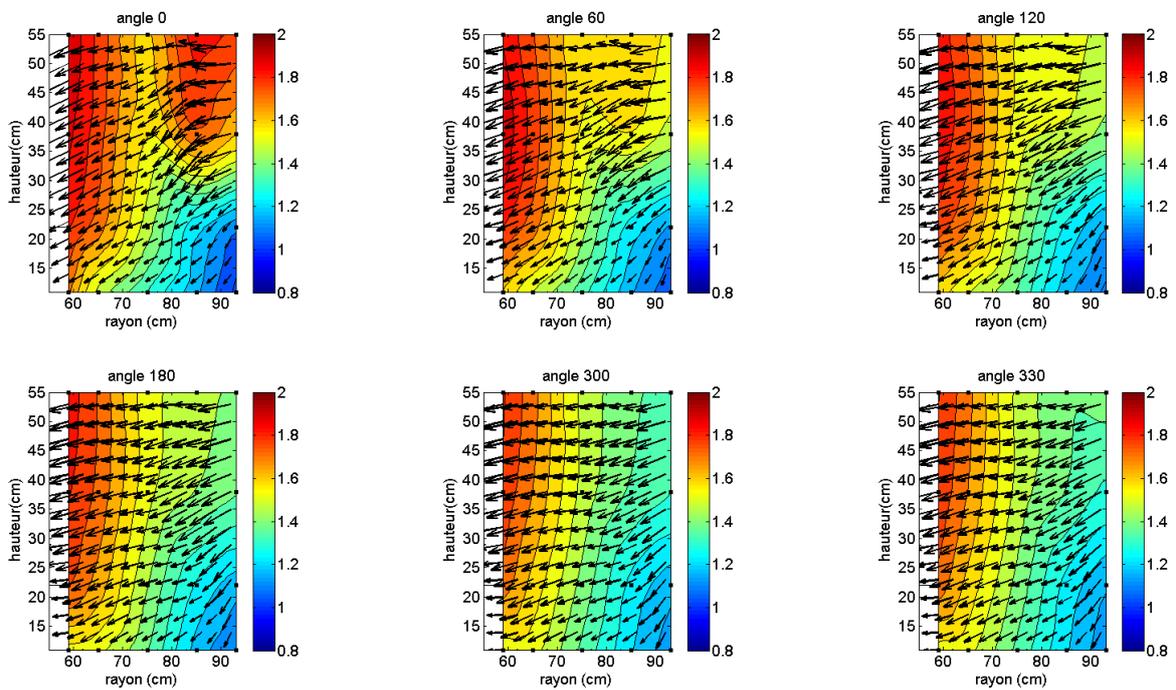


Figure 63. Champs de vitesse tangentielle et courants secondaires pour un débit de 50 l/s

### Influence de la taille des orifices sur l'écoulement

Pour la grille présentant des orifices de plus grande taille (27 x 5,1 mm), les vitesses sont légèrement plus faibles que pour une grille présentant des plus petits orifices (17 x 1,65 mm). Ce constat montre que plus les orifices sont petits, plus la circulation autour de la grille est importante. On remarque également que les courants secondaires diffèrent entre les deux configurations. En présence de petits orifices, la direction des courants secondaires est quasi-uniforme (*Figure 59*). En revanche, pour une grille avec des orifices plus grands, on observe de nombreuses recirculations secondaires (*Figure 65*).

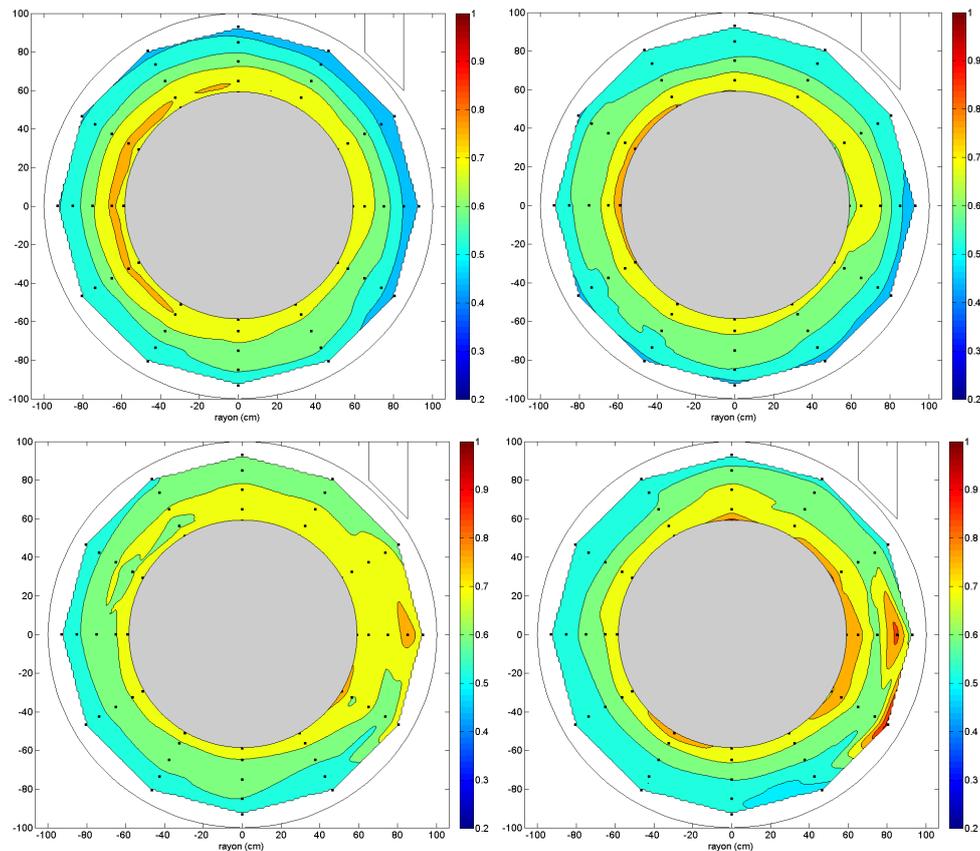
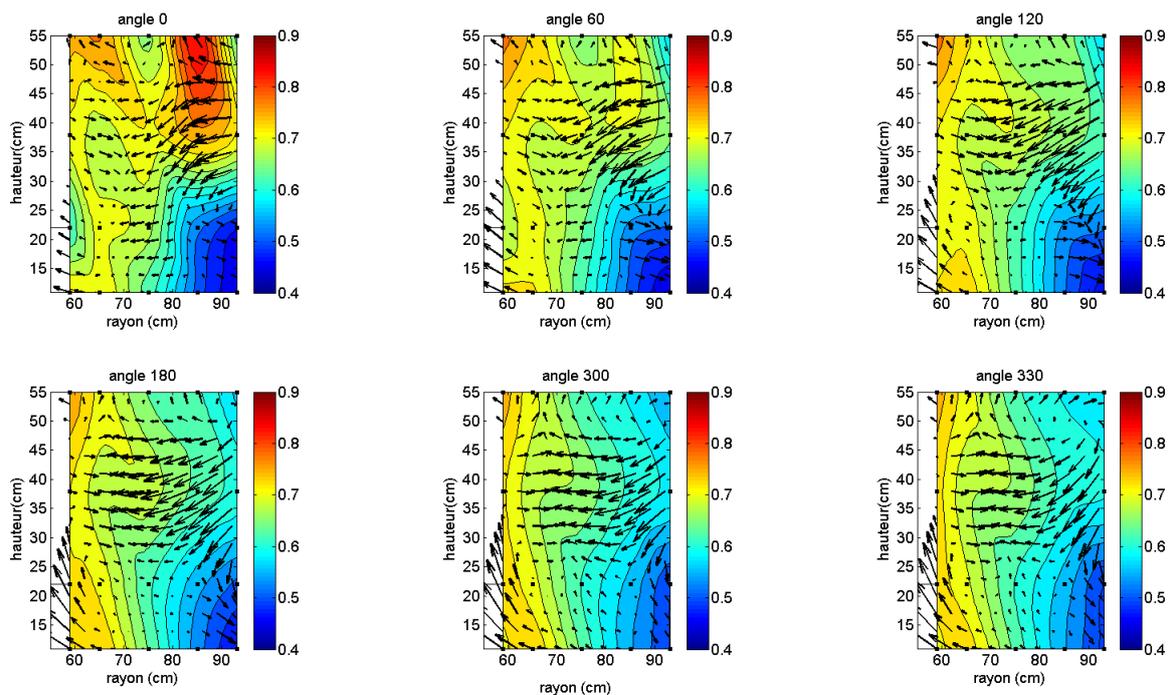


Figure 64. Champs de vitesse normale pour un débit de 25l/s avec la grille "grandes mailles"



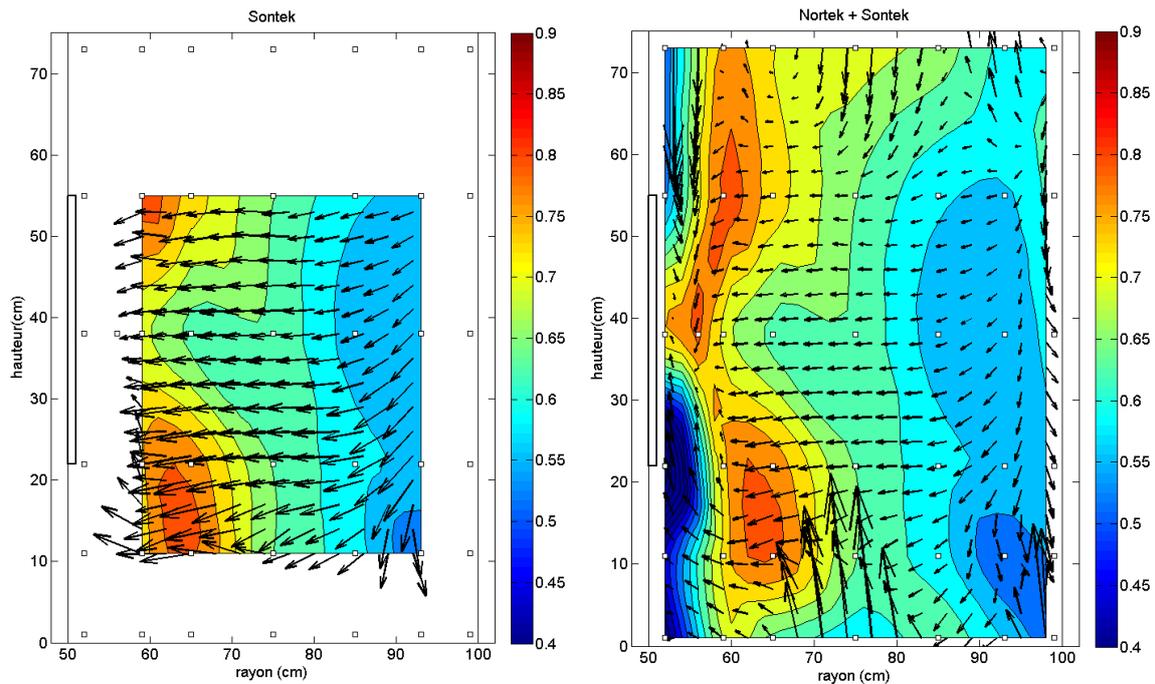
**Figure 65. Champs de vitesse tangentielle et courants secondaires pour un débit de 25 l/s avec la grille "grandes mailles"**

## 1.2 Analyse des débits

A partir de la distribution de vitesse dans les plans verticaux, on peut calculer les débits de passage dans chaque plan. Etant donné que le capteur utilisé pour cartographier les débits ne permet de mesurer qu'une surface limitée (*Figure 45*), nous avons associé les mesures obtenues avec l'ADV *Sontek* avec l'ADV *Nortek* en position *side-looking* dans le but d'estimer l'incertitude sur les vitesses moyennes et les débits. L'analyse de reproductibilité (*Annexe A*) a permis de justifier la superposition des deux instruments.

La cartographie obtenue avec l'ADV *Sontek* a permis de calculer une vitesse moyenne de 0,71 m/s +/- 1%. En associant ces valeurs avec celles obtenues avec l'ADV *Nortek* en position *side-looking*, la vitesse moyenne est de 0,69 m/s +/- 1% (en gardant l'incertitude la plus haute) (*Figure 66*). Rapportés à la surface mouillée, les débits sont respectivement de 259 et 253 l/s.

En utilisant uniquement l'ADV *Sontek*, l'erreur relative commise (par rapport à la superposition des 2 capteurs) sur le calcul des vitesses moyennes et du débit est de 3 %. Pour résumer, l'utilisation du seul capteur ADV *Sontek* permet de mesurer un débit avec une incertitude de 3 %.



**Figure 66. Champs de vitesse tangentielle et courants secondaires pour un débit de 25 l/s avec la grille "petites mailles" avec et sans l'ADV Nortek pour le plan 180°**

### **Influence du débit d'injection sur les débits en circulation dans l'ouvrage**

A partir de la distribution de vitesse dans les plans verticaux, on peut calculer le débit de passage dans chaque plan pour différents débits injectés.

Le graphique ci-dessous (*Figure 67*) met en avant l'évolution du débit circulant dans la partie extérieure du pilote pour différents débits injectés. Le premier constat que l'on peut faire concerne la valeur des débits en circulation : le débit circulant dans l'ouvrage est environ 10 fois supérieur au débit injecté.

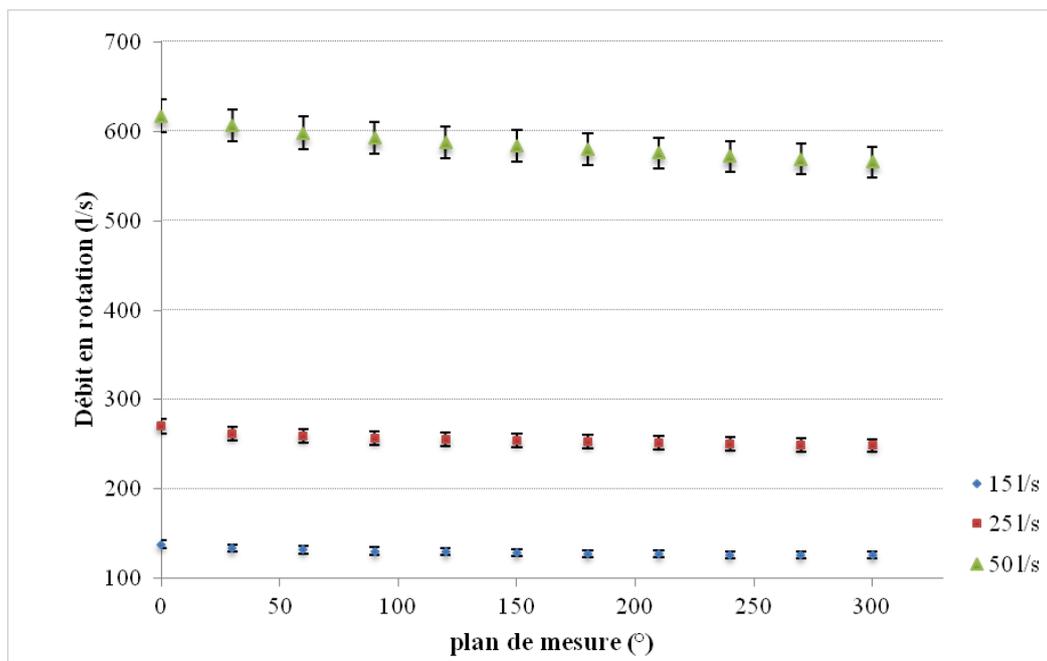


Figure 67. Evolution du débit en circulation pour différents débits injectés

D'autre part, l'analyse de ces données permet de retrouver le débit transitant par la grille. En régime permanent, le débit transitant par la grille correspond au débit injecté dans le pilote. La différence entre le premier et le dernier plan (respectivement  $0^\circ$  et  $300^\circ$  dans notre cas) permet de calculer le débit de passage dans la grille :

- 12 l/s pour un débit d'injection de 15 l/s
- 21 l/s pour un débit d'injection de 25 l/s
- 51 l/s pour un débit d'injection de 50 l/s

En tenant compte de l'erreur de 3% commise lors du calcul des vitesses moyennes pour un même plan, le débit transitant par la grille correspond bien au débit d'injection dans le pilote.

Il devient donc intéressant d'étudier plus précisément cette répartition, en observant notamment les fractions de débit transitant entre chaque plan. La Figure 68 montre une inégale répartition du débit traversant la grille quelque soit le débit d'injection dans le pilote. Environ 35 % de la totalité du débit traverse entre le plan  $0^\circ$  et  $30^\circ$  pour des débits d'injection de 15 et 25 l/s, et 20 % pour un débit de 50 l/s. On constate cependant qu'à partir d'un quart de tour, la répartition devient plus homogène (environ 8 %). Cette répartition peut s'expliquer par l'influence de la conduite d'entrée sur la colonne d'eau déjà en circulation. On peut effectivement faire l'hypothèse que le débit injecté crée une zone de contraction repoussant le fluide en circulation vers la grille, comme schématisé sur la Figure 69. L'observation des courants secondaires dans le plan  $0^\circ$  vient confirmer ce phénomène de "poussée" (Figure 59).

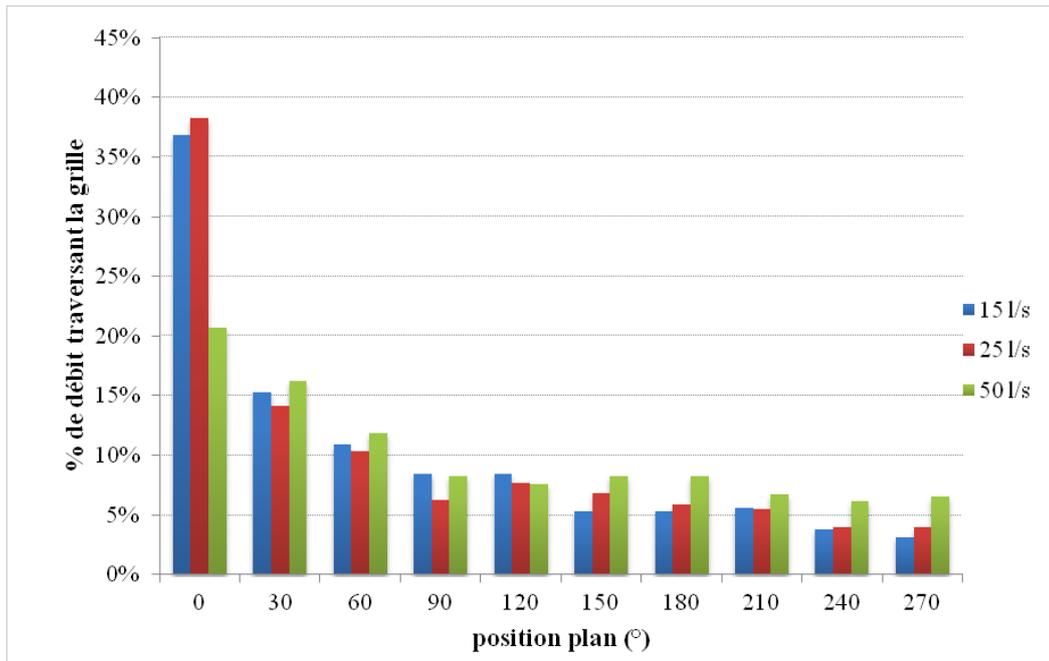


Figure 68. Pourcentage du débit traversant la grille pour différents débits injectés

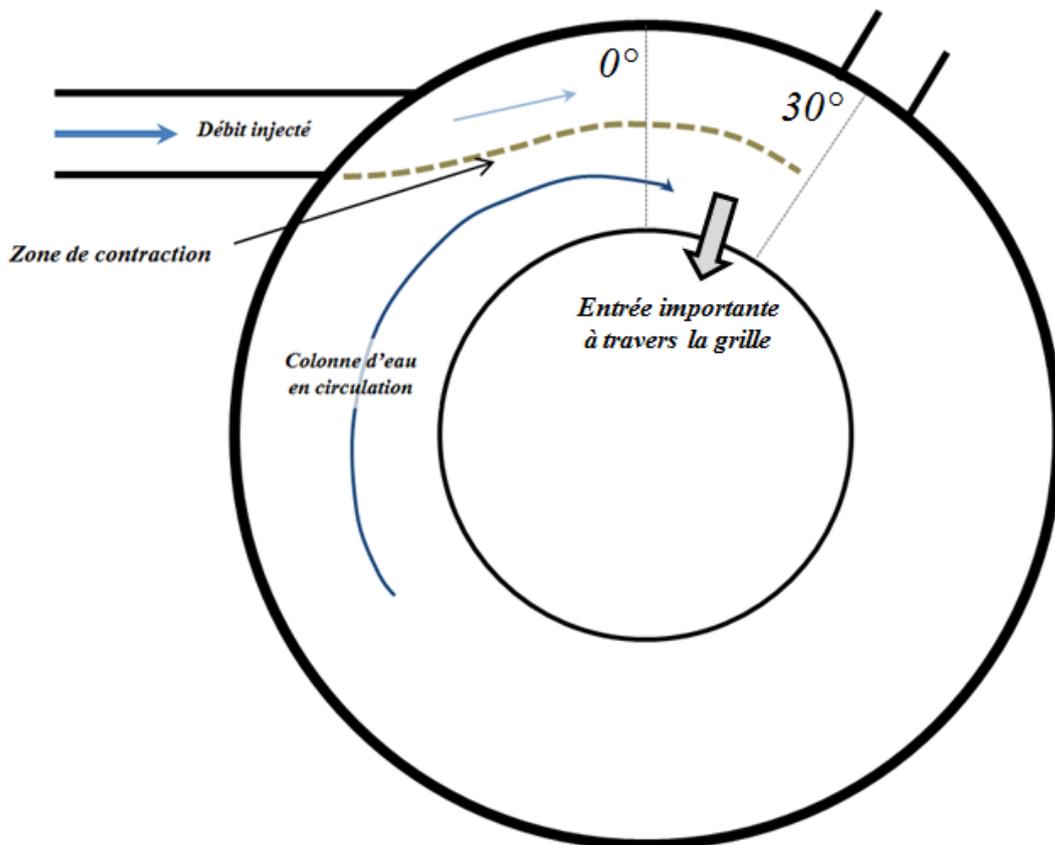


Figure 69. Contraction de la colonne d'eau en circulation

### Influence de la taille des orifices de la grille sur les débits en circulation dans l'ouvrage

L'objectif de cette partie est d'observer l'influence de la grille sur l'écoulement en circulation dans l'ouvrage. En comparant les débits en circulation pour deux grilles différentes pour un même débit injecté (25 l/s), on s'aperçoit que les débits en circulation sont légèrement plus importants pour la configuration avec les petites mailles (environ 15 l/s).

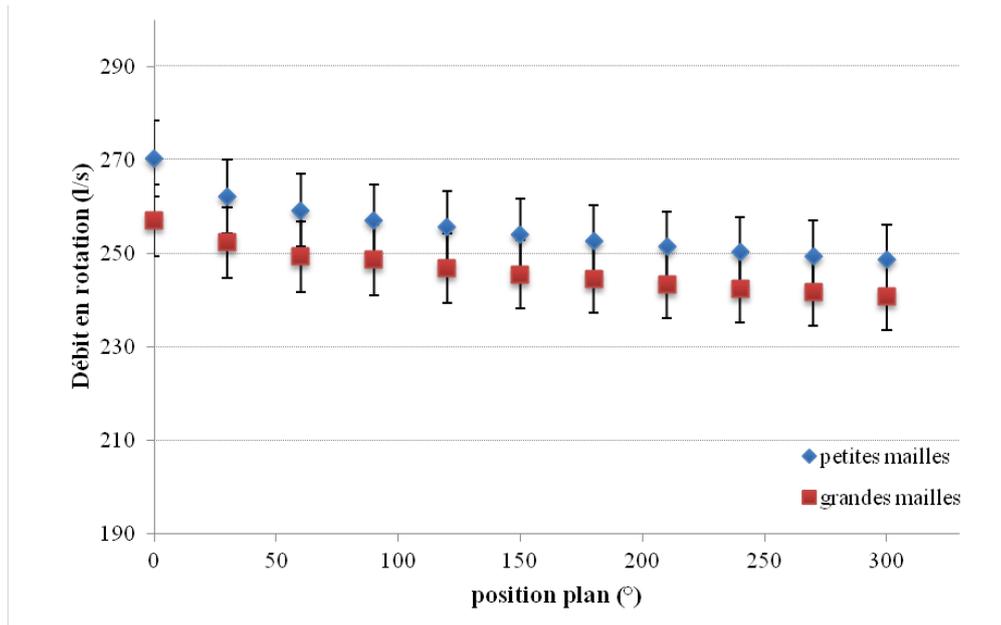


Figure 70. Evolution du débit en circulation pour deux grilles différentes pour un débit de 25 l/s

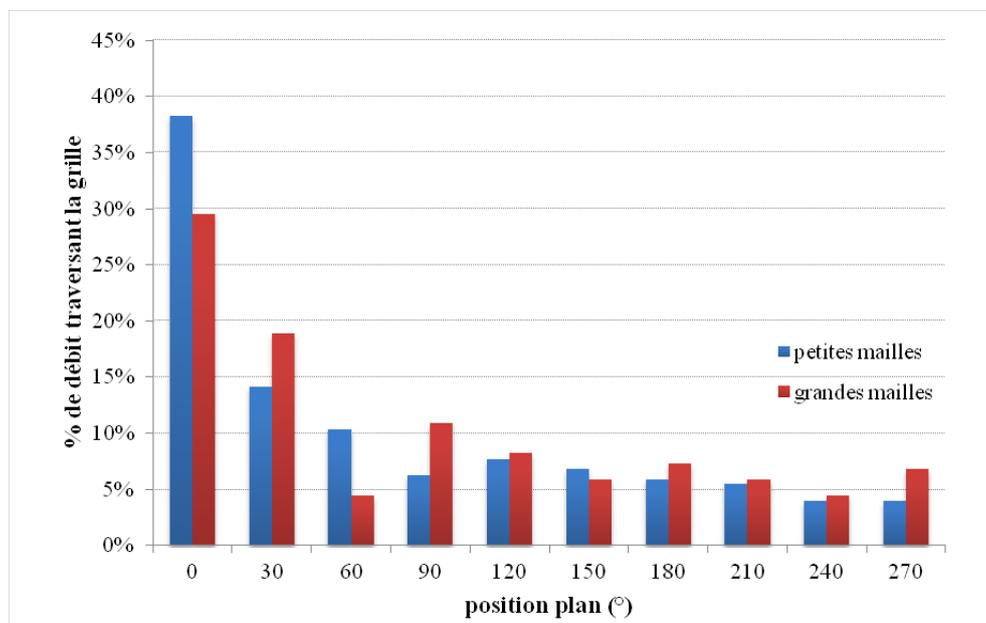


Figure 71. Pourcentage du débit traversant la grille pour deux grilles différentes pour un débit de 25 l/s

Concernant la répartition des débits traversant la grille (*Figure 71*), on constate la même évolution pour les deux configurations. Environ 35 % du débit total traverse la grille dans la première portion et l'allure est globalement identique aux résultats précédents sur la totalité de la surface de la grille. Par conséquent, la taille des mailles n'influence quasiment pas la répartition du débit traversant la grille.

Les résultats sur la répartition d'entrée en grille sont très intéressants car ils montrent que pour tous les débits, et quelle que soit la grille, plus de 30 % du débit traverse la grille dans le premier plan. Par conséquent, par analogie avec l'écoulement, on peut faire l'hypothèse que cette partie de la grille sera plus propice à un colmatage. La seconde remarque que l'on peut faire est que ces résultats sont liés à la forme de l'ouvrage. Ainsi, la modification de la répartition des débits d'entrée en grille passe par une optimisation de la forme de l'ouvrage (par exemple en modifiant la position de la conduite d'entrée, en utilisant des aménagements intérieurs,...).

### 1.3 Analyse de la surface libre

#### Analyse qualitative de la surface libre en fonction du débit

D'un point de vue qualitatif, les investigations menées pour différents débits ont permis de mettre en avant certaines caractéristiques de la surface libre.

Pour des faibles débits (inférieurs à 15 l/s), la surface libre est relativement plane (*Figure 72*). La différence de hauteur entre la paroi extérieure et la paroi intérieure est très faible.

Pour des débits plus importants (à partir de 25 l/s), la surface libre commence à onduler (*Figure 73*). Ces ondulations sont observées dans le premier quart de tour (entre 0° et 90°), au niveau de la paroi centrale (*Figure 74*). On remarque également une inclinaison importante de la surface libre. Cette inclinaison augmente très rapidement avec l'augmentation du débit (*Figure 75*).



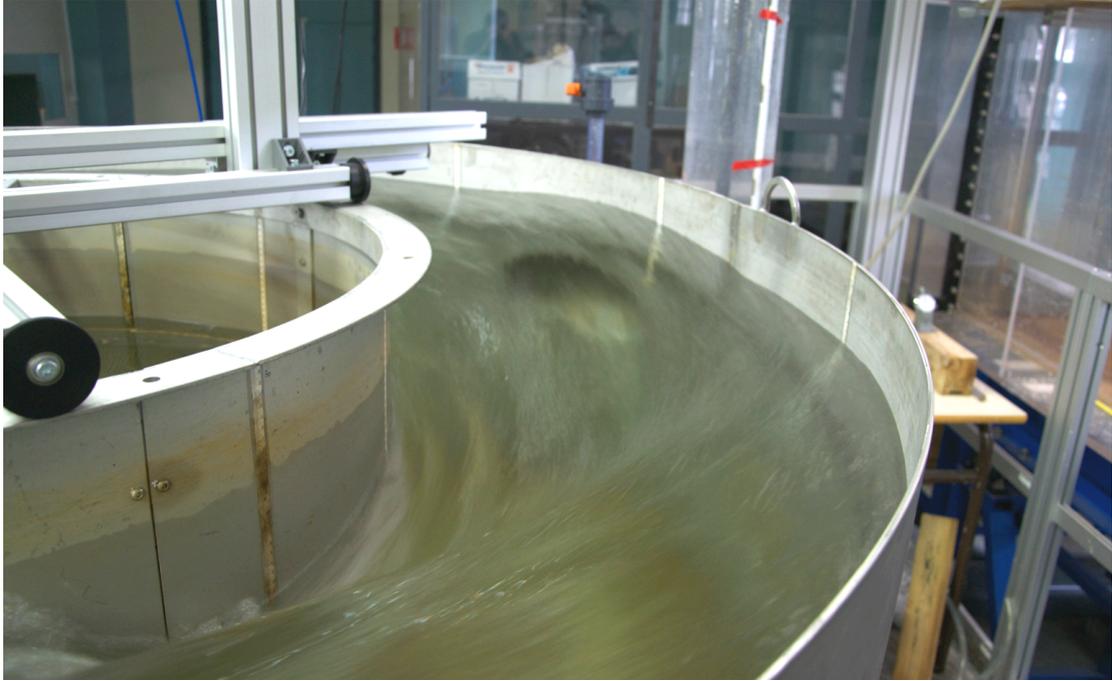
*Figure 72. Photographie de la surface libre pour un débit d'injection de 15 l/s*



*Figure 73. Photographie de la surface libre pour un débit d'injection de 25 l/s*

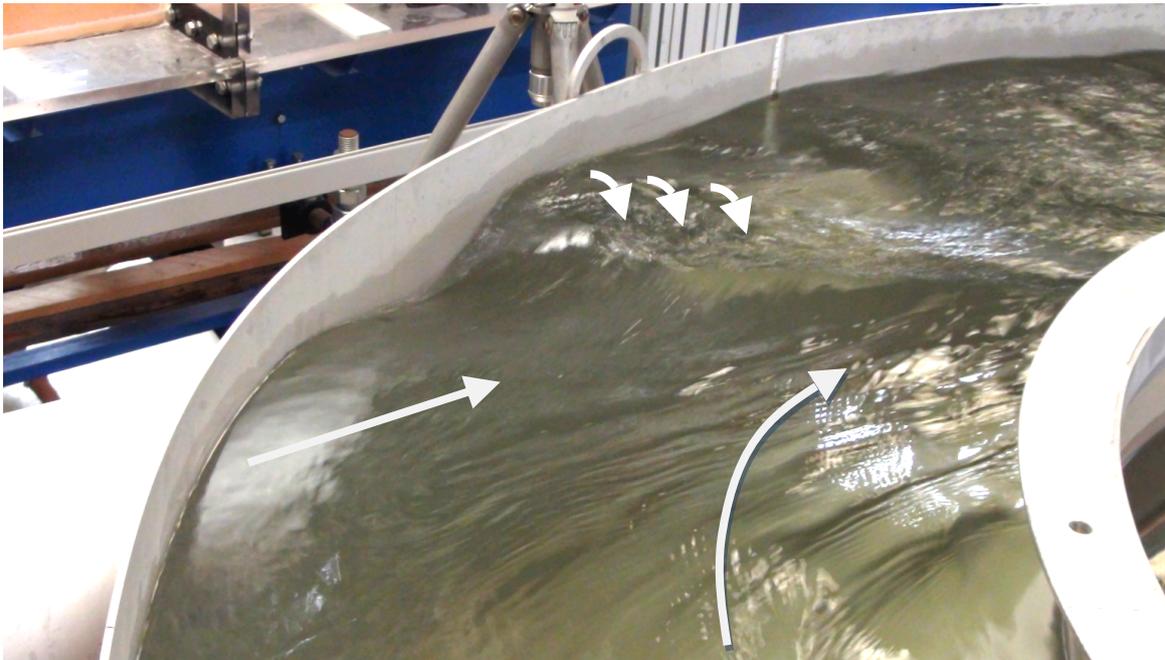


*Figure 74. Photographie de la surface libre pour un débit d'injection de 40 l/s dans le plan 30°*



*Figure 75. Photographie de la surface libre pour un débit d'injection de 50 l/s*

Lorsque la conduite d'entrée est noyée, on observe une ondulation au niveau de la surface libre (Figure 76). On peut supposer que cette onde est générée par la jonction de la colonne d'eau en rotation et le fluide injecté. On peut supposer que cette onde n'a pas d'impact potentiel. Il sera cependant intéressant d'observer la capacité du modèle numérique à reproduire ce phénomène.



*Figure 76. Photographie de la surface libre pour un débit d'injection de 40l/s : influence de l'injection du débit dans le pilote*

### Analyse quantitative de la surface libre

L'instrumentation du pilote a permis de mesurer une partie des phénomènes observés et décrits ci-dessus. La différence de hauteur  $\Delta h$  entre la hauteur d'eau proche de la paroi extérieure et la hauteur d'eau proche de la grille a pu être quantifiée. Les mesures ont permis de calculer l'angle d'inclinaison de la surface libre en fonction des débits injectés (Figure 77) à partir de l'équation (7).

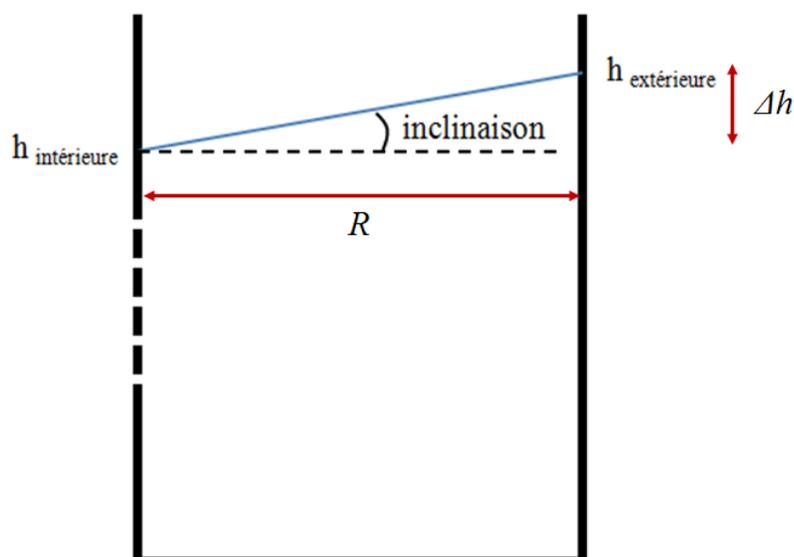


Figure 77. Illustration de l'inclinaison de la surface libre

$$\alpha = \Delta h \times \tan(R) \quad (7)$$

avec  $\alpha$  l'inclinaison,  $\Delta h$  la différence de hauteur entre les deux parois et  $R$  la distance entre les deux parois.

L'ensemble des résultats est rapporté dans le *Tableau 10*.

Q (l/s)	Différence hauteur entre paroi extérieure et la paroi centrale (cm)	inclinaison (°)
15	1,5	1,7
25	4	4,6
50	14	15,6

Tableau 10. Analyse de la différence de hauteur d'eau et de l'inclinaison de la surface libre pour différents débits

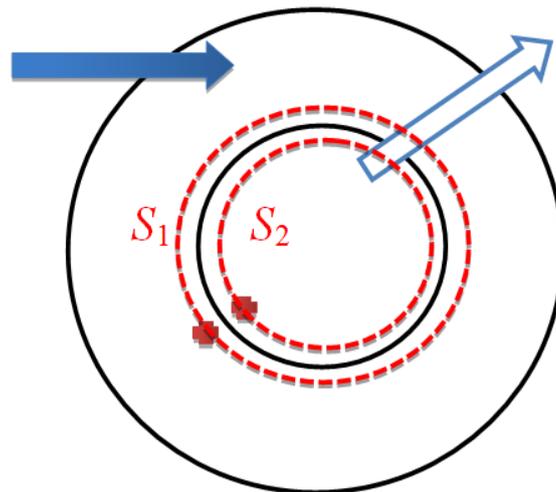
Concernant les valeurs, on remarque que l'inclinaison est très importante pour des grands débits (15° pour 50 l/s).

## Influence de la grille sur la surface libre

L'influence de la nature de la grille sur la surface libre a également été étudiée. Nous avons remarqué que dans la partie extérieure, on obtient des valeurs équivalentes quelque soit la grille de séparation utilisée. Les angles d'inclinaison sont par conséquent identiques en fonction du débit d'injection. En revanche, nous avons remarqué des différences de hauteurs d'eau entre l'extérieur et la partie centrale du pilote. Cette différence de hauteur est liée aux mécanismes de pertes de charge propres à chaque grille.

### 1.4 Pertes de charge

La connaissance des pertes de charge de la grille constitue l'un des objectifs de la thèse. Dans cette partie, nous avons donc cherché à déterminer les pertes de charges provoquées par les grilles. Les premiers essais ont mis en évidence une hétérogénéité du niveau d'eau le long de la grille, notamment à proximité de l'entrée. Afin de s'affranchir des difficultés de mesure liées à ce constat, la hauteur d'eau moyenne a été mesurée dans une région stable (avec le moins d'ondulations) sur une longue période. Cette zone est représentée par des croix rouges sur la *Figure 78* et correspond au plan  $240^\circ$ .



*Figure 78. Zones de mesure de la surface libre pour le calcul des pertes de charge*

La configuration étant très spécifique (fort débit en circulation autour de la grille, débit qui traverse la grille de façon non-homogène,...), nous devons utiliser une méthode spécifique pour déterminer les pertes de charge. En effet, la notion de différence de charge pour quantifier la perte d'énergie entre deux sections n'est strictement valable qu'entre des sections sur lesquelles circulent le même débit.

Effectuons un bilan énergétique entre deux sections  $S_1$  et  $S_2$  situées juste avant et juste après la grille, ainsi qu'illustré ci-dessus en traits pointillés rouges. Le théorème de l'énergie cinétique donne une équation de puissances (Pernès, 2004) :

$$\iint_{S_1} \rho g \left( z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} \right) \cdot V_{r1} dS_1 = \iint_{S_2} \rho g \left( z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \right) \cdot V_{r2} dS_2 + \Delta P \quad (8)$$

avec  $z$  : la cote altimétrique (m)

$P$  : la pression (Pa)

$V$  : la norme de la vitesse (m/s)

$S_1$  : la surface juste avant de la grille (m<sup>2</sup>)

$S_2$  : la surface juste après de la grille (m<sup>2</sup>) ;  $S_1 = S_2$

$V_r$  : la vitesse radiale (m/s)

$\Delta P$  : la perte de puissance qui peut également s'écrire  $\rho g \Delta H Q$

$\rho$  : la masse volumique de l'eau (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : l'accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>)

$\Delta H$  : la perte de charge provoquée par la grille (m)

$Q$  : le débit de passage (débit entrant dans l'ouvrage) (m<sup>3</sup>/s)

En tirant profit du caractère hydrostatique de la pression et en considérant une distribution uniforme de la vitesse, la relation devient :

$$\left( h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) \cdot Q = \left( h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \cdot Q + \Delta H \cdot Q \quad (9)$$

avec  $h_1$  et  $h_2$  les hauteurs d'eau à l'extérieur et à l'intérieur de la grille. La vitesse à l'intérieur de la grille vaut environ 0,2 m/s, ce qui correspond à un  $V^2/2g$  inférieur à 1 mm. Le terme  $V_2^2/2g$  est donc négligeable dans la formulation. Il vient :

$$\left( h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) = h_2 + \Delta H \quad (10)$$

d'où

$$\left( h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - h_2 = \Delta H \quad (11)$$

Dans cette dernière équation, le terme  $h_1 + \frac{V_1^2}{2g}$  correspond à la charge juste avant la grille ;  $h_2$  à la charge juste après. Précisons que  $V_1$  est la norme de la vitesse (qui est importante du fait de la forte

composante tangentielle) et non pas la composante perpendiculaire à la grille (qui est quant à elle très faible).

On choisit d'exprimer cette perte selon le formalisme classique des pertes singulières. Pour la vitesse, on prend le débit divisé par la surface de la grille ( $\pi Dh_{grille}$ ) qui correspond au formalisme classiquement utilisé pour les grilles (Idel'cik, 1986).

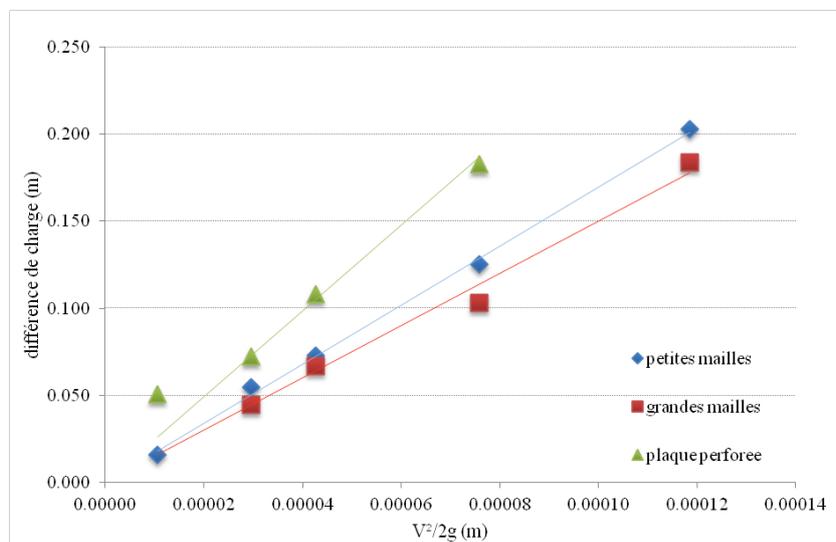
$$\Delta H = K \cdot \frac{\left( \frac{Q}{S_{grille}} \right)^2}{2g} \quad (12)$$

Les résultats obtenus *Figure 79* permettent de définir un coefficient de pertes de charge pour les trois grilles :

- $K_{grandes\ mailles} = 1500$
- $K_{petites\ mailles} = 1700$
- $K_{plaque\ perforée} = 2400$

Ces résultats sont en adéquation avec le pourcentage de vide propre à chaque grille. En effet, la grille de type métal déployé "grandes mailles" qui dispose du plus grand pourcentage de vide (0,78) est également celle qui correspond au plus petit coefficient de perte de charge. Par ailleurs, la plaque perforée, qui dispose de la plus petite porosité (0,44) est celle qui correspond au plus grand coefficient de perte de charge.

Ces résultats sont intéressants d'un point de vue technique car les grilles de type métal déployé permettent, grâce à leurs fortes porosités, de diminuer les pertes de charge tout en gardant une importante rigidité.



**Figure 79. Détermination des coefficients de perte de charge des grilles**

## 2. A L'ECHELLE DE LA GRILLE

Au sein de l'ouvrage, la grille joue un rôle primordial sur le comportement hydrodynamique : perte de charge, champ de vitesse, turbulence,... L'ensemble de ces phénomènes locaux peuvent impacter le transport solide : colmatage, rétention de matières en suspension.

L'objectif de cette partie consiste donc à étudier plus précisément les phénomènes hydrodynamiques à proximité immédiate de la grille. L'ADV en position *side-looking* devrait donc permettre d'étudier les champs de vitesses et les phénomènes de turbulence pour les différentes grilles.



*Figure 80. Photographie de l'ADV à l'amont de la grille (vue de profil)*



*Figure 81. Photographie de l'ADV à l'amont de la grille (vue isométrique)*

Les mesures sont effectuées dans le plan  $180^\circ$ , considéré comme le plan moyen, et à une hauteur  $z$  de 38 cm (hauteur correspondant au plan médian de la grille). Le capteur est déplacé de part et d'autre de la grille. La distance à la paroi est mesurée par le logiciel de traitement de l'ADV (*VectrinoPlus*).

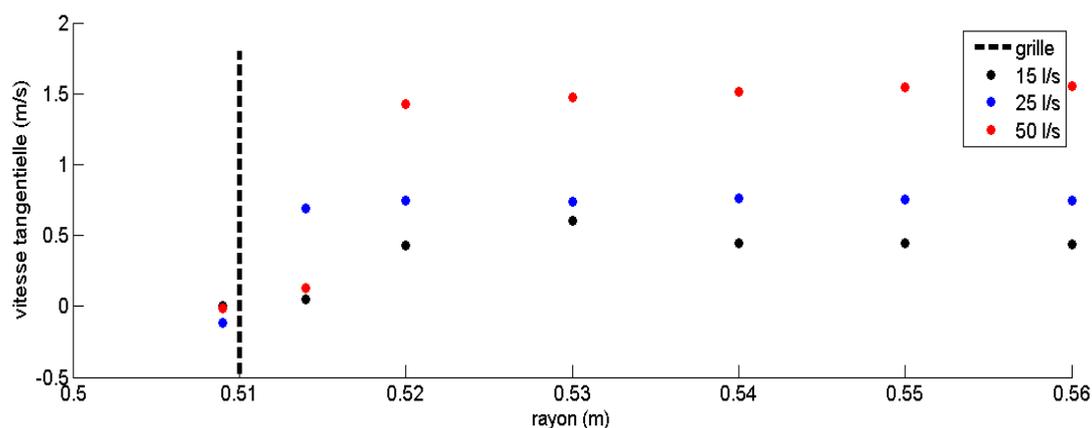
Sur les figures ci-dessous, la grille, marquée par des traits en pointillé, est située à un rayon de 0,51 m. Ceci signifie que les valeurs à gauche correspondent aux grandeurs à l'intérieur de la grille et celles à droites aux valeurs à l'extérieur de la grille.

## 2.1 Vitesses à proximité de la grille

### Influence du débit sur le champ de vitesse

La *Figure 82* permet d'observer l'influence du débit sur les vitesses tangentielles. A l'extérieur de la grille (pour un rayon allant de 0,51 à 0,56 m), on remarque que les vitesses tangentielles augmentent avec le débit. Lorsque l'on se rapproche de la grille, on constate une diminution des vitesses. Dans la partie intérieure, les vitesses sont très proches de zéro et les valeurs sont négatives. Ceci montre que l'écoulement dans la partie interne s'effectue en sens inverse à l'écoulement de la partie extérieure.

D'autre part, les vitesses radiales sont similaires dans la partie centrale et augmentent à l'amont de la grille avec le débit (*Figure 83*). Notons tout de même que les valeurs des vitesses sont très faibles. Elles sont environ dix fois plus petites que les vitesses tangentielles.



*Figure 82. Vitesses tangentielles à l'amont et à l'aval de la grille GM pour différents débits*

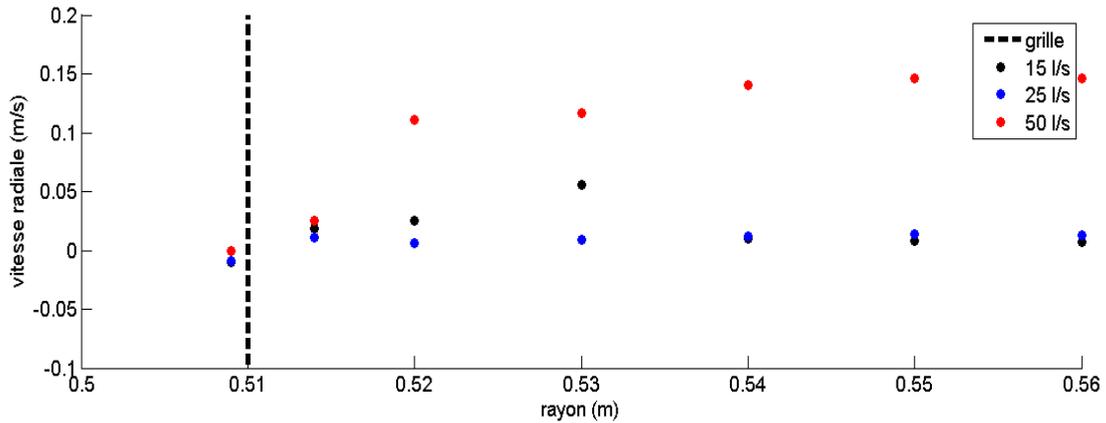


Figure 83. Vitesses radiales à l'amont et l'aval de la grille GM pour différents débits

### Influence de la grille sur le champ de vitesse

Pour un même débit, on constate que les champs de vitesses sont identiques à l'amont de la grille (Figure 84). En revanche, on observe des différences dans la partie intérieure. Pour les deux grilles de métal déployé, on observe des valeurs négatives alors que pour la plaque perforée les valeurs sont positives. Ceci démontre que la forme de la grille influence le sens du courant. L'inclinaison des bandelettes de métal permet ainsi d'inverser le sens de l'écoulement. Cette observation est intéressante car elle permet de supposer l'existence de phénomènes de recirculations dans l'entrefer. La modélisation numérique apportera très certainement des réponses à ce sujet.

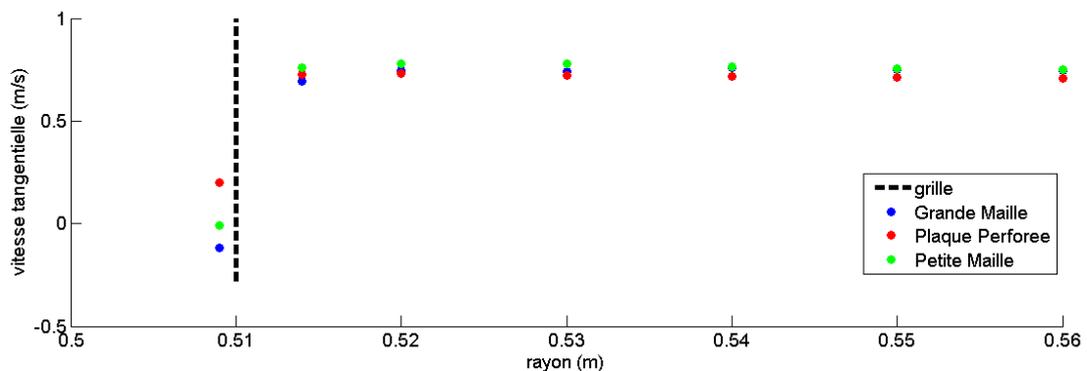


Figure 84. Vitesses tangentielles à l'amont et l'aval pour différents types de grilles et un débit de 25 l/s

## 2.2 Turbulence à proximité de la grille

La turbulence joue un rôle important dans dispersion du transport solide. Dans ce contexte, nous avons cherché à observer l'influence du débit et de la forme de la grille sur les phénomènes de turbulence à proximité des orifices. Cette turbulence est quantifiée en calculant l'énergie cinétique turbulente définie par l'équation (5).

### Influence du débit sur la turbulence

Pour la grille de type métal déployé "grandes mailles" (mailles 27 x 5,1 mm), on observe une légère augmentation de l'énergie cinétique turbulente à l'amont de la grille (Figure 85). De plus, plus le débit est important, plus l'énergie cinétique turbulente est grande. Pour un débit de 50 l/s, l'énergie cinétique turbulente augmente fortement à l'aval de la grille. Ceci signifie que pour des débits très importants, de fortes fluctuations de vitesses sont présentes en sortie de la grille.

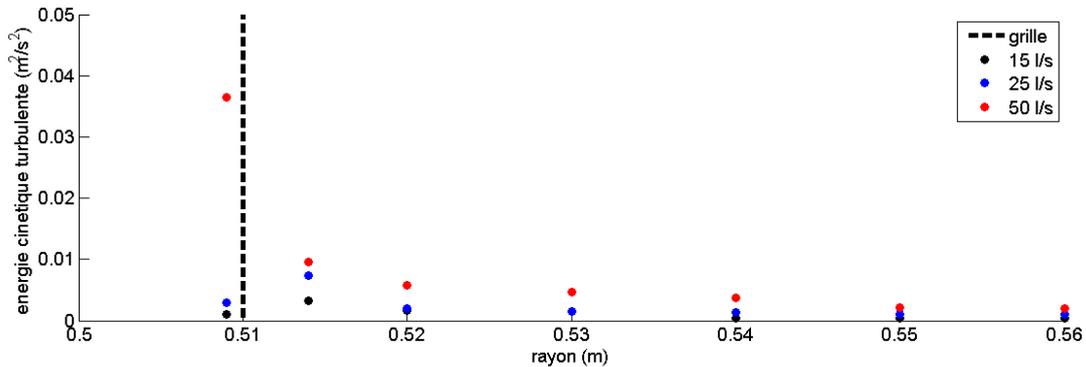


Figure 85. Energie cinétique turbulente à l'amont et l'aval de la grille GM pour différents débits

### Influence de la grille sur la turbulence

Pour un même débit, on observe des comportements différents pour les 3 grilles (Figure 86). En comparant les grilles de type métal déployé, on constate que la grille avec des petites mailles (17 x 1,65 mm) génère beaucoup plus d'énergie cinétique turbulente à l'amont (0,03 m²/s²) que la grille avec des grandes mailles (0,01 m²/s²). Les résultats pour la plaque perforée montrent une génération de turbulence à l'aval de la grille. La valeur de l'énergie cinétique turbulente atteinte pour la plaque perforée à l'aval de la grille est très importante (0,14 m²/s²).

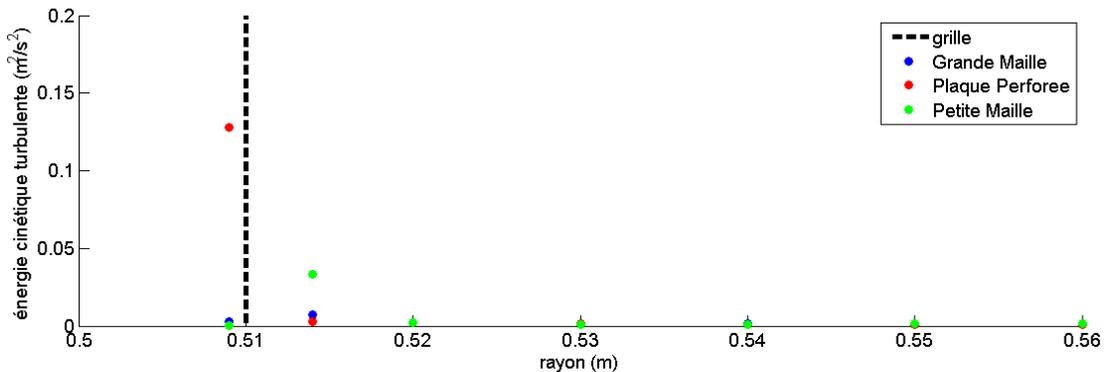


Figure 86. Energie cinétique turbulente à l'amont et l'aval pour différents types de grilles et un débit de 25L/s

Ces observations sont très intéressantes dans le sens où l'énergie cinétique turbulente permettra de dissiper les polluants. On peut donc faire l'hypothèse que les grilles de type plaque perforée sont plus propices au colmatage en raison de l'absence de ces phénomènes turbulents. D'autre part, nous avons remarqué que la diminution de la taille des orifices et/ou l'angle d'inclinaison du métal permet d'augmenter ces phénomènes. Une étude numérique permettra ainsi de vérifier et de compléter l'étude sur les phénomènes locaux. De plus, la modélisation des phénomènes locaux permettra de visualiser les phénomènes physiques "non mesurables", en particulier au niveau de l'entrefer.

### III. TRANSPORT SOLIDE

L'objectif principal de l'ouvrage est de retenir un maximum de macro-déchets tout en diminuant le colmatage. De plus, la capacité de l'ouvrage à retenir des matières en suspension sera également testée. Par conséquent, les jeux d'expériences réalisés et décrits dans le *Tableau 11* doivent nous permettre d'évaluer l'efficacité du pilote en terme de rétention de polluants.

Expérience	Description de l'expérience	Débits testés	Type de grille
1	Analyse qualitative de la trajectoire des macro-déchets	15, 25 et 50 l/s	PM - GM - PP
2	Test de colmatage avec des feuilles en régime permanent	25 l/s	PM - GM - PP
3	Etude de la sédimentation et de la remise en suspension en régime transitoire	25 l/s (débit de consigne max)	PM
4	Etude qualitative de la sédimentation en fonction du type de particules	15 et 25 l/s	PM
5	Etude de l'influence de la grille sur le transport solide	25 l/s	PM - GM - PP

*Tableau 11. Description des expériences effectuées en transport solide*

#### 1. EFFICACITE DU PILOTE A RETENIR LES MACRO-DECHETS

##### 1.1 Analyse qualitative de la trajectoire des macro-déchets

Un premier jeu d'expériences a consisté à visualiser le comportement des macro-déchets en fonction du débit pour différentes grilles.

A faible débit (15 l/s) et pour la grille "grandes mailles", on constate une répartition relativement uniforme des déchets dans tout le volume du pilote. Les canettes de soda, relativement lourdes une fois remplies d'eau, sédimentent et tournent lentement dans le fond de l'ouvrage. En revanche, pour un débit plus important (50 l/s), les déchets s'agglomèrent et tournent à proximité de la grille. Ce phénomène s'explique très certainement par les vitesses radiales plus importantes pour les grands débits. En effet, en régime permanent, plus le débit est important, plus le débit de passage à travers la grille est grand. D'autre part, on remarque que les déchets de faible épaisseur (feuilles d'arbres ou papiers) obstruent régulièrement les orifices de la grille. Les plastiques, les bouchons et les canettes

vides restent en surface. Les filtres de cigarettes et les canettes remplies d'eau tournent autour de la grille sans la colmater.

L'observation de la trajectoire des polluants pour les deux autres grilles (petites mailles et plaque perforée) est identique à celle observée pour une grille "grandes mailles". A 15 l/s, seules les canettes de soda tournent au fond et les autres déchets sont répartis de manière aléatoire. En augmentant le débit (50 l/s), les canettes ont tendance à remonter et à être dirigées vers la grille. Pour résumer, les caractéristiques de la grille n'ont pas d'influence visible sur le comportement de la trajectoire des macro-déchets.



*Figure 87. Prise de vue des macro-déchets dans le pilote à un débit de 15 l/s*

## **1.2 Etude du colmatage de la grille**

Les essais précédents ont montré que les feuilles peuvent obstruer relativement rapidement les orifices. Nous avons donc utilisé des morceaux de papier pour tester le colmatage la grille, jugeant ce macro-déchet comme étant le plus contraignant.

Une première expérience a été réalisée, en régime permanent, afin de déterminer la concentration de papier nécessaire jusqu'à l'obturation totale de la grille. Pour ces expériences de colmatage, nous avons utilisé des morceaux de papier rectangulaires (5 x 7 cm) pour représenter au mieux les feuilles d'arbres ou des lingettes. De plus, ce choix se justifie également dans l'objectif de répétabilité des expériences. Il est nettement plus simple de disposer de morceaux de papier que de feuilles d'arbres identiques.

L'expérience consiste à injecter ces morceaux de papier au rythme de 60 morceaux toutes les 30 secondes.

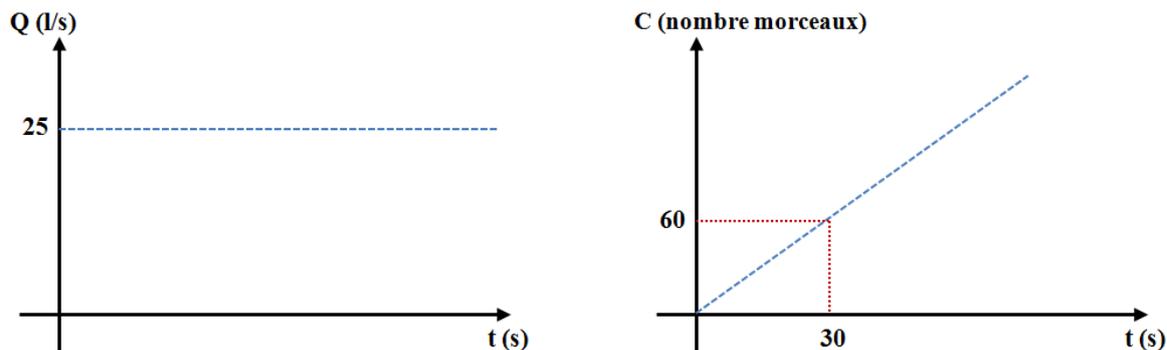


Figure 88. Protocole expérimental : régime permanent et quantité injectée en fonction du temps

Le suivi des deux hauteurs d'eau de part et d'autre de la grille, plus précisément de leur différence, permet de diagnostiquer le colmatage en fonction du temps. Celui-ci débute lorsque la différence de hauteurs d'eau augmente. En effet, le débit étant constant, une augmentation de la différence de hauteurs d'eau traduit une augmentation de la perte de charge due à la grille, et donc un colmatage de celle-ci. Notons que le capteur à l'extérieur de la grille est situé à une distance de 17 cm de la grille.

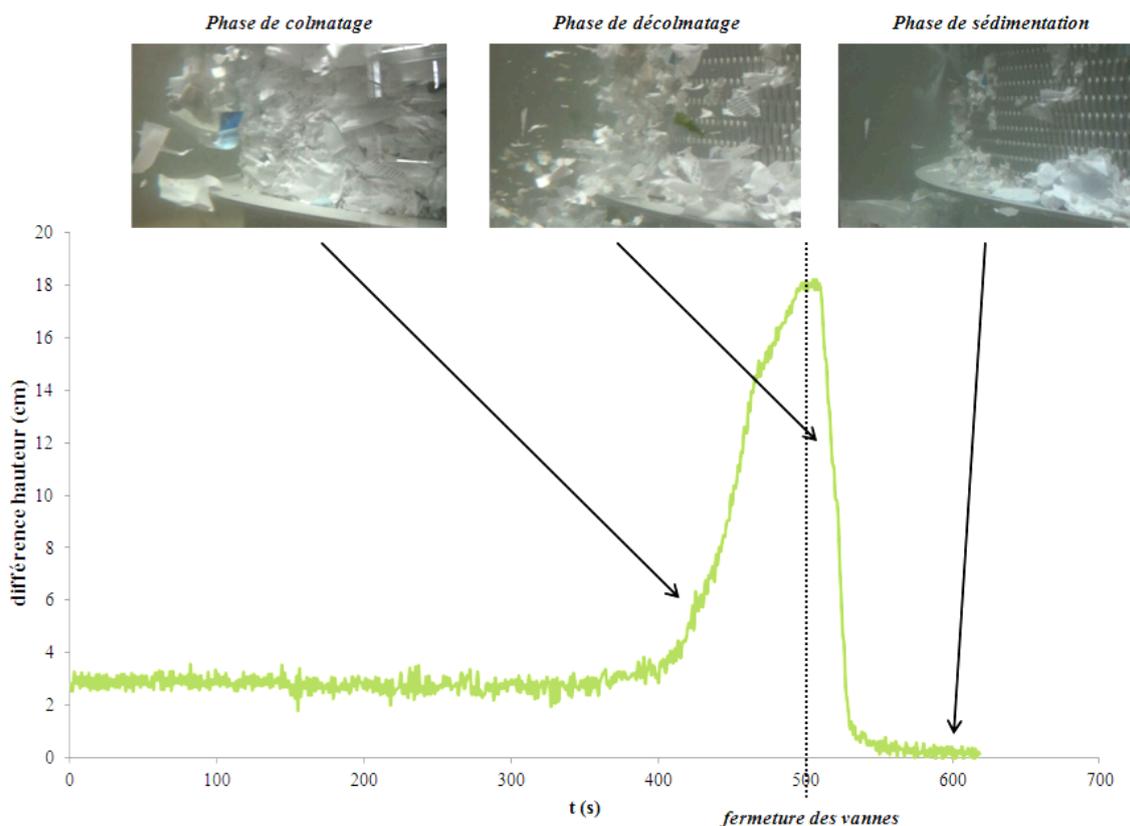


Figure 89. Evolution de la différence de hauteur d'eau dans le pilote en fonction du temps et de la concentration en feuille

Cette différence est observée après avoir injecté 780 morceaux de papier dans le pilote (*Figure 89*). On peut se permettre de dire que la quantité en papier est plutôt conséquente. D'autre part, ce test nous a permis d'observer l'évolution rapide du processus de colmatage.

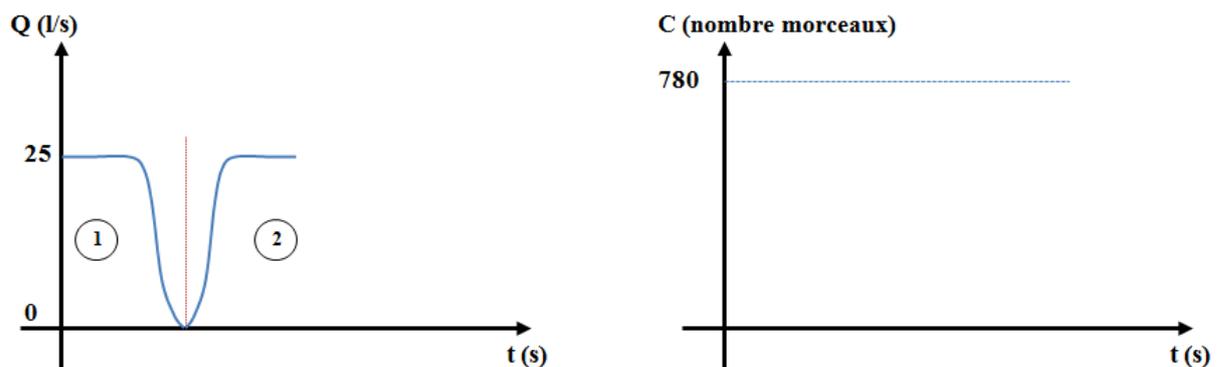
Une fois le processus de colmatage observé, nous avons fermé simultanément les vannes amont et aval dans le but de simuler une fin de pluie. Si logiquement les niveaux d'eau s'égalisent, on observe un phénomène de décolmatage de la grille, puis de sédimentation des papiers. Cette observation s'explique par l'arrêt des vitesses radiales poussant les déchets vers la grille. D'autre part, ce constat montre donc que le processus de colmatage n'est pas irréversible.

Pour les autres grilles (grandes mailles et plaque perforée), le même comportement est observé. Cependant, une différence est constatée sur la durée et/ou la quantité de feuilles nécessaire avant d'observer le colmatage. Pour la grille de type métal déployé avec les "grandes mailles", la phase de colmatage débute après l'injection de 750 morceaux de feuilles, soit une quantité légèrement inférieure à celle observée pour la grille "petites mailles". Pour la plaque perforée, une quantité moins importante est nécessaire au colmatage, puisque l'on observe le phénomène après avoir injecté l'équivalent de 600 feuilles.

En raison de la difficulté de mise en œuvre, ces tests n'ont été réalisés qu'une seule fois.

### 1.3 Etude du colmatage en régime transitoire

Une nouvelle expérience a été réalisée dans le but de visualiser le comportement des feuilles lorsque l'on simule un nouvel évènement pluvieux. Le schéma d'expérience comme illustré sur la *Figure 90*, consiste à faire varier le débit au cours du temps et à garder une concentration constante de déchets (aucun déchet n'a été ajouté durant l'expérience). La phase 1 correspond à la fin d'une pluie et la phase 2 à la reprise d'une pluie.



*Figure 90. Protocole expérimental : simulation d'une reprise de pluie*

L'expérience de reprise de pluie, correspondant à la phase 2, a permis de mettre en évidence la remise en suspension des feuilles lors de la reprise du débit. Les données des niveaux d'eau ont permis de calculer la différence de hauteur afin de visualiser le colmatage (Figure 91). Au démarrage, la différence de hauteur est d'environ 3 cm, puis les papiers remontent petit à petit avant de recolmater la grille et d'augmenter la différence de hauteur. Il faut environ 20 secondes pour recolmater complètement la grille et passer de 3 cm de différence de hauteur à 14 cm.

Notons que ce test a été répété plusieurs fois et que le phénomène se reproduit après chaque reprise de pluie. Cependant, un seul test a été mesuré avec les sondes de hauteurs.

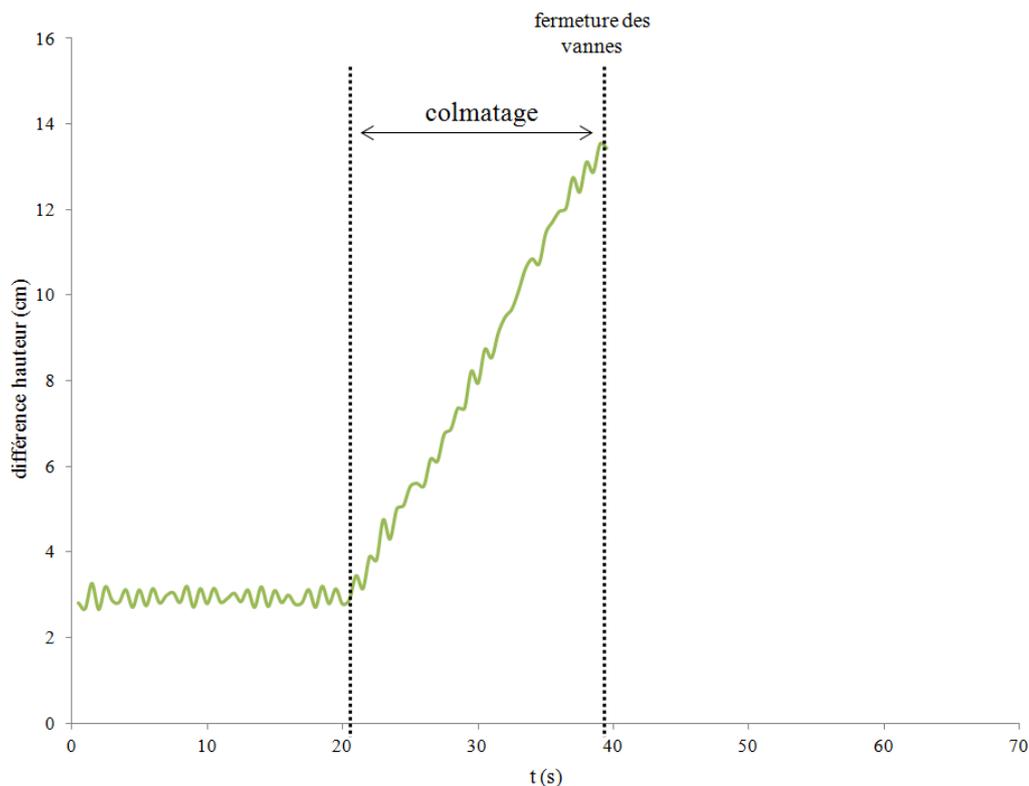


Figure 91. Evolution de la différence de hauteur d'eau lors d'une reprise de pluie

## 2. EFFICACITE DU PILOTE A RETENIR DES PARTICULES

### 2.1 Analyse qualitative de la trajectoire des MES dans le pilote

Si les macro-déchets sont trop volumineux pour traverser les ouvertures de la grille, nous avons testé plusieurs particules pouvant potentiellement traverser les orifices. L'objectif consiste donc à visualiser l'influence des caractéristiques des particules sur les phénomènes de sédimentation, dans le pilote, en régime permanent. La description qualitative de ces expériences permet de mettre en évidence de nombreux phénomènes.

La trajectoire des particules de faibles masses volumiques (polystyrol et PET) injectées dans le pilote suivent le flux entrant (*Figure 92*). Nous avons vu précédemment que le flux entrant dans l'ouvrage était plaqué contre la paroi. Un comportement similaire est donc adopté par les particules.

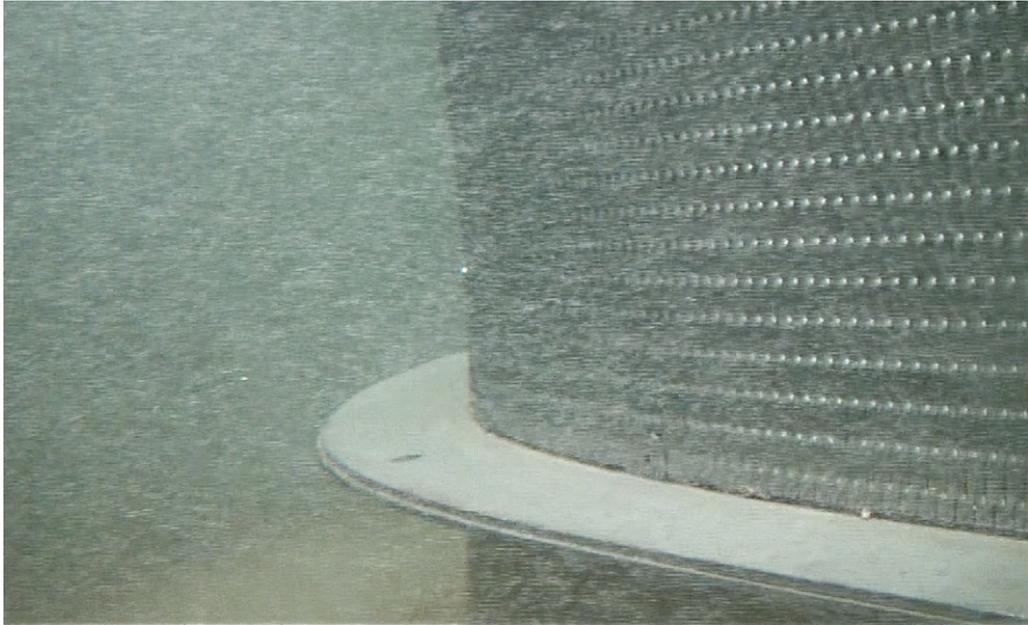
La dispersion des particules de polystyrol dans l'écoulement est constatée après 1/4 de tour sur toute la largeur (correspondant à l'angle 90°). La répartition est ensuite très homogène pour les particules les plus petites (polystyrol blanche) (*Figure 92*). Les particules les plus grosses (polystyrol noir) sont entraînées vers la grille et tournent autour (*Figure 94*).

Les particules dotées d'une masse volumique plus importante sont caractérisées par un comportement différent. Les billes en verre ainsi que les particules de PET sédimentent rapidement dans l'ouvrage. Les billes en verre sédimentent dès l'entrée dans l'ouvrage, puis tournent autour de l'anneau central. Les particules de PET effectuent en moyenne un tour autour de la grille avant de circuler dans le fond du pilote (*Figure 95*). Pour ce type de particules, aucun contact avec la grille n'a été déploré.

Les résultats obtenus sont également très intéressants dans le cadre de la validation des modèles numériques. En effet, les résultats obtenus étant très variés, nous pourrions comparer ces différents résultats avec ceux qui seront testés avec les modèles numériques.



*Figure 92. Comportement des particules de polystyrol blanches en entrée de l'ouvrage*



*Figure 93. Particules de polystyrol blanches en circulation autour de la grille PM*



*Figure 94. Particules de polystyrol noir en circulation autour de la grille PM*



*Figure 95. Particules de PET après injection (à gauche) et après avoir effectué un tour (à droite)*

## 2.2 Analyse de l'influence de la grille

Nous avons observé précédemment que la forme de la grille jouait un rôle sur les propriétés hydrodynamiques à proximité de la grille, intéressons nous à présent si la forme des grilles permet également d'influencer le rendement de l'ouvrage.

Pour étudier l'efficacité des grilles, il est important d'utiliser des particules susceptibles de traverser la grille. Dans ce sens, l'utilisation des particules de polystyrol est idéale puisque leur faible masse volumique leur permet d'être en grande partie pilotées par l'hydrodynamique.

### Particules de polystyrol blanches

Une première analyse quantitative a permis d'évaluer la performance et l'influence de la forme des grilles face aux billes de polystyrol blanches ( $738 \mu\text{m}$  et  $1034 \text{ kg/m}^3$ ).

Le protocole consiste à placer un volume  $V_{particules}$  de particules dans la colonne et de mélanger avec un volume d'eau ( $V_{eau}$ ) afin d'ajuster la concentration  $c_{colonne}$  en particules (voir Figure 55). Les particules sont ensuite injectées à débit constant dans le circuit hydraulique. La durée de l'expérience est calculée en fonction du temps de séjour hydraulique. Dans cette expérience, la durée est fixée à 9 minutes, soit 10 fois le temps de séjour d'une particule fluide.

A la fin de l'expérience (9 minutes), les vannes à l'amont et à l'aval du pilote sont fermées simultanément. L'injection de particules est également stoppée. Le volume  $V_{particules \text{ récupérées}}$  mesuré permet de quantifier les particules passées par l'ouvrage. Les particules piégées dans l'ouvrage sont elles aussi récupérées, puis mesurées. Le volume piégé dans le bassin correspond à l'équation ci-dessous.

$$V_{particules \text{ piégées}} = V_{particules \text{ introduites}} - V_{particules \text{ récupérées}} \quad (13)$$

L'efficacité définie par l'équation (14) est jugée en calculant le rendement sur les volumes.

$$\eta = V_{\text{particules piégées}} / V_{\text{particules introduites}} \quad (14)$$

Le fait de mesurer l'efficacité via des volumes permet de gagner du temps entre les manipulations (en évitant par exemple le séchage des particules). En revanche, l'incertitude sur le résultat est plus importante. L'incertitude sur la lecture du volume dans la colonne (environ 0,1 cm) correspond à une incertitude de +/- 1 % sur le rendement.

Ce protocole a également été reproduit pour des durées de 3, 12 et 18 minutes pour montrer que les rendements n'étaient pas liés à la durée de l'expérience. De plus, chaque expérience a été réalisée deux fois de manière à s'assurer de la reproductibilité des résultats. Les résultats correspondent à la moyenne des deux expériences.

Les résultats obtenus pour les deux grilles de types métal déployé sont rapportés dans le *Tableau 12*. On constate que le rendement au bout de 9 minutes est identique pour les deux grilles (en tenant compte de l'incertitude). De plus, les concentrations présentes dans le pilote après l'arrêt des vannes correspondent aux concentrations injectées. En d'autres termes, ce constat signifie que le pilote ne permet pas de jouer un rôle concentrateur car l'ensemble des particules de polystyrol qui entrent, sortent.

	<b>Grandes mailles</b>	<b>Petites mailles</b>
<b>Rendement <math>\eta</math></b>	11,5 %	11%

*Tableau 12. Efficacité des grilles de type métal déployé face aux billes de polystyrol blanches*

En raison des résultats obtenus sur les deux grilles de type métal déployé, on peut faire l'hypothèse que la grille de type plaque perforée n'aura également aucun effet concentrateur, d'autant plus que les phénomènes physiques observés sur la plaque perforée ne sont pas propices à des phénomènes de dispersion de particules à proximité de la grille. De ce fait, nous n'avons pas jugé pertinent le fait d'effectuer une expérience sur une plaque perforée.

### **Particules de polystyrol transparentes**

En raison d'une faible quantité de particules de polystyrol transparentes (1500  $\mu\text{m}$  et 1060  $\text{kg/m}^3$ ) à notre disposition, nous avons décidé d'adopter un protocole différent pour tester l'influence des grilles.

Dans ces expériences, un volume  $V_{particules}$  est injecté instantanément dans le pilote à l'aide d'une éprouvette graduée (injection de type échelon). La durée des expériences a également été réduite à 3 minutes, soit 2 fois le temps de séjour. Pour vérifier la reproductibilité des expériences, nous avons réalisé chaque expérience deux fois. L'incertitude sur le rendement est de +/- 1 %.

L'efficacité des grilles est donc estimée à partir de l'équation (14). Les rendements sont donnés dans le *Tableau 13* et correspondent à la moyenne des deux expériences.

	<b>Grandes mailles</b>	<b>Petites mailles</b>	<b>Plaque perforée</b>
<b>Rendement <math>\eta</math></b>	8 %	61%	2%

*Tableau 13. Rendement des grilles face aux billes de polystyrol transparentes après 3 minutes*

Contrairement aux expériences réalisées avec les billes de polystyrol de faible diamètre (738  $\mu\text{m}$ ), on observe sur le *Tableau 13* des différences de rendement en fonction du type de grille. Après 3 minutes, 61% des particules injectées sont toujours en circulation dans l'ouvrage en utilisant la grille "petites mailles". Par comparaison, avec la grille "grandes mailles" le rendement du pilote est de 8 %. Plusieurs hypothèses peuvent être faites pour expliquer ces différences. La première hypothèse concerne l'influence des ouvertures de la grille. En effet, pour la "petites mailles", la largeur des ouvertures est de 1,65 mm, soit légèrement plus important que la taille des particules (1,5 mm). Au contraire, la largeur des ouvertures pour la "grandes mailles" est de 5,1 mm. Ainsi, la taille des ouvertures pourraient expliquer la difficulté des particules à passer par la grille avec des "petites mailles". La seconde hypothèse, beaucoup plus difficile à démontrer, concerne les phénomènes physiques provoqués par la grille. Les mesures de turbulence effectuées à l'aide de l'ADV ont démontré des différences de comportement hydrodynamiques à proximité de la grille. Pour la grille avec des "petites mailles", nous avons mesuré un taux d'énergie cinétique turbulente (0,035  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) important à proximité de la grille, alors que pour la "grandes mailles", l'énergie cinétique turbulente était trois fois plus petite (0,01 $\text{m}^2/\text{s}^2$ ). Ainsi, l'énergie cinétique turbulente, qui est un facteur de dispersion des particules, permettrait d'éjecter plus de particules pour une grille avec des "petites mailles". Dans ce contexte, l'étude du transport solide et de l'influence de la forme des grilles en utilisant la modélisation numérique est nécessaire. Elle permettra notamment de discuter de la seconde hypothèse.

D'autre part, la comparaison entre la plaque perforée et la grille "grandes mailles" est beaucoup plus simple en raison des caractéristiques similaires entre ces deux grilles. Les deux grilles ont des ouvertures très proches (27 x 5,1 pour la "grandes mailles" et 20 x 5 pour la plaque perforée). De

même, la porosité est également voisine (0,48 pour la "grandes mailles" et 0,44 pour la plaque perforée). Ainsi, seule la forme influence les résultats. Pour la plaque perforée, quasiment toutes les particules ont traversé la grille (2% de particules restant dans le pilote). Pour la grille "grandes mailles", le rendement est de 8 %. Ces résultats nous incitent à dire que l'efficacité est plus importante pour une grille de type métal déployé par rapport à une plaque perforée. Ici encore, la modélisation numérique devrait nous apporter des précisions, à la fois sur les phénomènes produits par la forme de la grille, ainsi que sur les interactions fluide/particules.

En termes de perspectives, nous pouvons noter dans cette partie la difficulté à mettre en place des tests de transport de particules (particules à disposition, protocole à définir en fonction des particules et du dispositif d'injection). Ainsi, l'étude du transport solide pourrait être améliorée en mettant en place un dispositif encore plus sophistiqué et permettant de répéter rapidement le protocole.

## CONCLUSION DE LA PARTIE 2

Les objectifs de ce travail expérimental étaient de :

- caractériser l'écoulement et identifier l'influence de la grille sur l'écoulement
- tester l'aptitude de la grille face au colmatage et à la rétention de fines particules

Les investigations menées à l'échelle globale ont permis de cartographier les profils de vitesse en fonction du débit injecté. Ces profils se distinguent par de fortes vitesses à proximité de la grille et des vitesses plus faibles au niveau des parois extérieures. L'étude comparative entre différentes configurations a permis de montrer que la nature de la grille n'avait que très peu d'influence sur le champ de vitesse global et les débits en circulation. Les mécanismes de pertes de charge singulières propres à chaque grille ont également été déterminés. L'installation d'une grille de type métal déployé permet de diminuer les pertes de charge par rapport à une plaque perforée. Ces différences s'expliquent notamment par l'important pourcentage de vide laissé par les grilles à métal déployé.

Les caractéristiques hydrodynamiques à proximité de la grille ont été mesurées. Cette étude a mis en évidence les champs de vitesse et de turbulence à l'amont et à l'aval de chaque grille. Les données ont clairement démontré le rôle du métal déployé en favorisant la production d'énergie cinétique turbulente à l'amont de la grille. A l'inverse, l'utilisation d'une plaque perforée permet d'obtenir des champs d'énergie cinétique turbulente important à l'aval de la grille.

La seconde partie du travail a été de mettre en évidence le transport solide dans le pilote. Une analyse qualitative a permis de visualiser la trajectoire des macro-déchets et les processus de sédimentation des MES dans le pilote. Les expériences ont montré l'aptitude du système face au colmatage. Le comportement hydraulique de l'ouvrage et notamment les vitesses tangentielles élevées à proximité de la grille assure la rotation des déchets limitant ainsi le colmatage. Des tests de colmatage ont également permis de montrer qu'une grille de type métal déployé permettait de ralentir les phénomènes de colmatage par rapport à une plaque perforée. Enfin, l'utilisation de particules de faible masse volumique a permis de montrer l'influence de la grille sur l'efficacité. Pour de très faibles diamètres, la grille n'influence pas le rendement de l'ouvrage. En revanche, pour des particules supérieures à 1 mm, la forme de la grille intervient dans l'efficacité du système. Nous n'avons pas pu démontrer si ces performances à retenir les particules, ou encore du ralentissement du colmatage, résultaient de la surface de la grille directement ou bien des phénomènes physiques provoqués par sa forme. De ce fait, la modélisation numérique devrait nous apporter plus de réponses.



# PARTIE 3

## MODELISATION NUMERIQUE

---

<b>Introduction de la partie 3 .....</b>	<b>116</b>
<b>I. Modélisation numérique multi-échelle .....</b>	<b>117</b>
1. Description de la méthodologie multi-échelle .....	118
2. Adaptation de la méthode au séparateur hydrodynamique .....	120
2.1 Détermination du coefficient de calage .....	120
2.2 Calage de la grille conceptuelle.....	122
<b>II. Description des modèles .....</b>	<b>124</b>
1. Modèle local - à l'échelle de la grille .....	124
1.1 Géométrie et maillage .....	124
1.2 Conditions aux limites.....	126
1.3 Modélisation de la turbulence .....	129
1.4 Conditions initiales.....	130
1.5 Schémas numériques .....	130
2. Modèle global - à l'échelle de l'ouvrage.....	130
2.1 Géométrie et maillage .....	131
2.2 Conditions aux limites.....	133
2.3 Modélisation de la turbulence .....	135
2.4 Conditions initiales.....	135
3. Modélisation du transport solide.....	135
3.1 A l'échelle de la grille .....	136
3.2 A l'échelle de l'ouvrage .....	137
<b>Conclusion de la partie 3 .....</b>	<b>139</b>

## INTRODUCTION DE LA PARTIE 3

Cette partie a pour objectif de présenter en détails la méthode numérique mise au point pour modéliser l'écoulement et le transport solide au sein de l'ouvrage étudié dans le cadre de cette thèse.

La première partie a pour but de décrire la méthodologie permettant de résoudre notre problématique à savoir, "comment prendre en compte les phénomènes physiques se produisant aux différentes échelles spatiales?" La bibliographie nous a permis de dégager la technique la plus intéressante pour résoudre ce problème : l'utilisation d'une approche multi-échelle. Cette approche va donc être présentée en adoptant la technique au code de calcul *Ansys Fluent*<sup>®</sup>. Le choix de ce code commercial se justifie par son utilisation intensive au sein du laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie de Strasbourg (ICube) ainsi qu'à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES). De plus, de nombreuses méthodologies ont été développées par les membres du laboratoire avec ce code pour la modélisation des écoulements à surface libre dans les ouvrages en assainissement. Les équations, mais aussi les méthodologies développées dans le cadre de ce doctorat, ne sont néanmoins pas liées à ce code de calcul. Elles peuvent en effet être mises en œuvre avec d'autres codes.

Dans un second temps, nous présenterons les différents modèles numériques construits et utilisés pour reproduire les phénomènes que l'on souhaite observer : les phénomènes à proximité immédiate de la grille et l'écoulement au sein de l'ouvrage.

## I. MODELISATION NUMERIQUE MULTI-ECHELLE

La modélisation numérique est utilisée depuis de nombreuses années pour tester, concevoir ou réhabiliter des ouvrages mais aussi pour observer des phénomènes physiques difficilement mesurables. Dans notre cas d'étude, l'étude expérimentale a permis d'observer différents phénomènes physiques mis en jeu au sein du séparateur hydrodynamique. Le constat certainement le plus important est l'influence de la forme de la grille sur l'écoulement au sein de l'ouvrage. En effet, nous avons remarqué que la grille influence plusieurs paramètres : le sens de l'écoulement, les pertes de charge, les phénomènes de turbulence,... Par conséquent, le modèle numérique doit pouvoir reproduire ces effets.

Pour pouvoir reproduire ces effets, le modèle doit être déterministe. En d'autres termes, la géométrie de l'ouvrage doit être construite le plus fidèlement possible, en particulier la forme de la grille. Cependant, une modélisation complète de l'ouvrage est difficile en raison du nombre prohibitif de mailles à utiliser pour prendre en compte à la fois les phénomènes locaux à proximité de la grille ainsi que le comportement global sur l'ensemble de l'ouvrage. En effet, pour mettre en évidence les différents phénomènes physiques discutés ci-dessus, il convient de discrétiser l'ouvrage en utilisant un maillage très fin à proximité de la grille, tout en discrétisant la géométrie complète de l'ouvrage. L'association de ces deux contraintes, qui entraîne un maillage à la fois fin et volumineux, se traduit par un coût de calcul très important. Une estimation du maillage est possible en utilisant les mêmes paramètres que Mendez (2007). En utilisant environ 15 mailles pour reproduire l'écoulement entre les orifices, la taille des mailles à utiliser pour la grille " petites mailles " avoisinerait 0,1 mm. En utilisant des mailles hexaédriques de cette taille sur l'ensemble de l'ouvrage, on obtiendrait au total environ  $5.10^{12}$  mailles.

Nous avons vu à travers la littérature qu'une telle problématique pouvait être résolue par une approche multi-échelle. Les phénomènes à déterminer se situant à deux échelles distinctes (*Tableau 14*), nous pouvons nous inspirer des techniques multi-échelles décrites dans la bibliographie.

<b>Phénomènes à observer</b>	<b>Echelle du phénomène</b>
Écoulement	
Distribution des vitesses dans l'ouvrage	Echelle de l'ouvrage
Répartition des débits	
Distribution des vitesses au niveau de l'entrefer	
Phénomènes de turbulence à proximité de la grille	Echelle de la grille

*Tableau 14. Phénomènes à observer avec le modèle et échelle à laquelle se situe le phénomène*

## 1. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE MULTI-ECHELLE

L'objectif recherché est de visualiser le comportement global de l'ouvrage tout en observant les phénomènes locaux à proximité de la grille. Pour ce faire, une première solution consiste à mailler finement l'ouvrage. Cette solution implique un temps de calcul très important et nécessite des outils informatiques très puissants. Une autre solution est d'utiliser une méthode multi-échelle qui consiste à diviser la géométrie de l'ouvrage en deux sous-modèles (Solution 2 sur la *Figure 96*) :

- un modèle déterministe permettant de reproduire avec précision les phénomènes locaux sur un volume restreint ;
- un modèle permettant de reproduire les phénomènes physiques à l'échelle du système en prenant en modélisant de manière conceptuelle les effets des phénomènes locaux visibles à l'échelle globale.

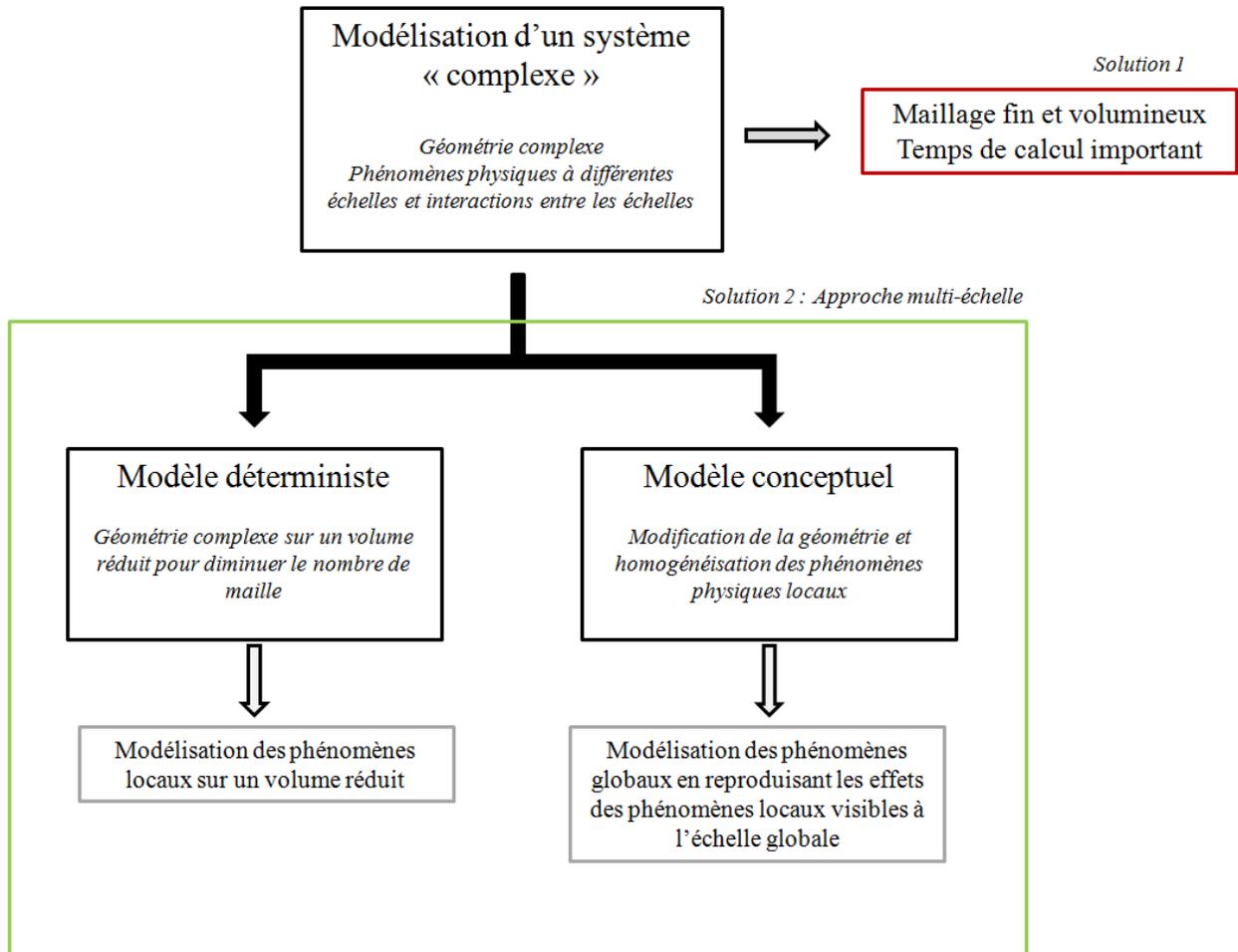
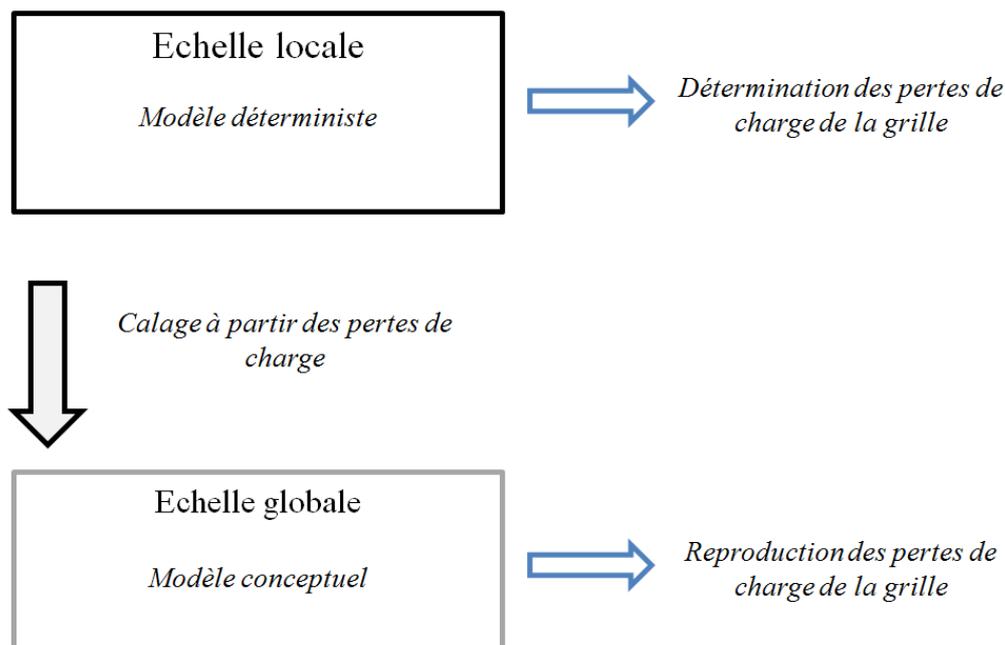


Figure 96. Description de l'approche multi-échelle

La méthodologie employée suscite deux difficultés majeures : l'homogénéisation ainsi que la direction des sous-modèles.

L'étude bibliographique nous a montré qu'en mécanique des fluides, les techniques d'homogénéisation étaient basées sur des approches de type milieu poreux. Ce constat s'explique par le fait qu'on peut considérer, à très grande échelle, que les écoulements peuvent se simplifier par des équations correspondant aux milieux poreux. De plus, dans le cas des grilles, la géométrie possède des propriétés généralement homogènes (forme, taille des ouvertures, surface de vide,...) ce qui implique également une certaine homogénéité des phénomènes physiques. En résumé, les effets de la grille sur l'écoulement peuvent être reproduits par un milieu poreux.

L'autre difficulté de la méthode concerne la direction des sous-modèles. Faut-il partir de l'échelle la plus grande et utiliser les résultats pour les introduire aux échelles plus petites? Ou bien faut-il partir de l'échelle la plus petite puis remonter vers l'échelle du système? Nous avons vu dans la bibliographie que le choix entre une approche *upscaling* ou *downscaling* sera définie en fonction des effets à reproduire et des données initiales. Dans notre cas d'étude, l'objectif est d'utiliser une approche conceptuelle permettant de reproduire les pertes de charge de la grille. Cependant, dans la mesure où les pertes de charge de la grille ne sont pas connues, il est nécessaire de les déterminer à partir du modèle local. Dans ce cas, une approche *upscaling* consistant à calculer les pertes de charge de la grille à partir d'un modèle déterministe est indispensable (*Figure 97*).

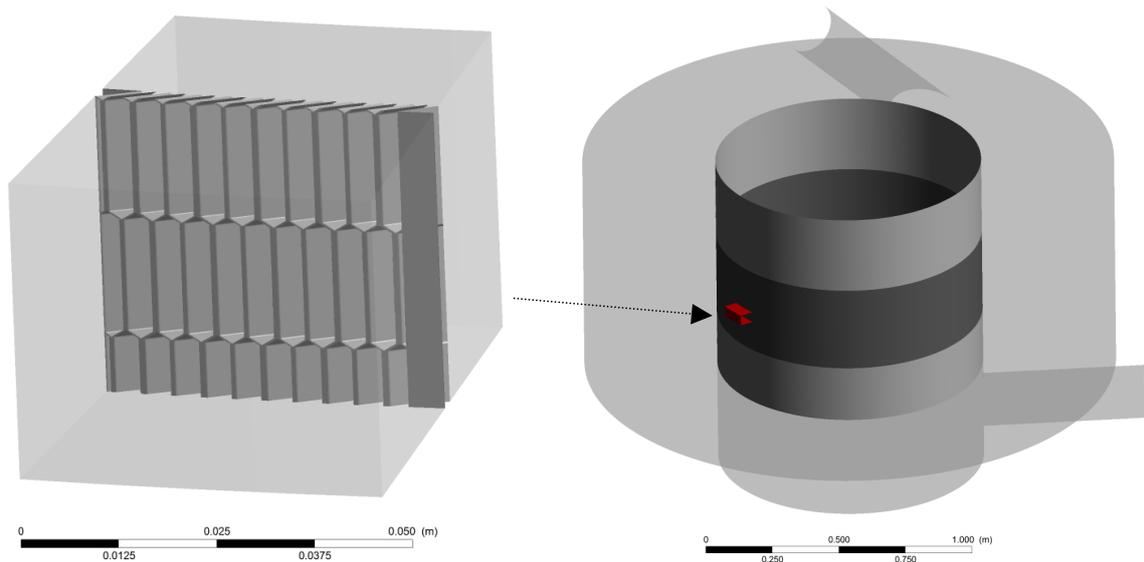


*Figure 97. Approche upscaling adaptée à notre problématique*

## 2. ADAPTATION DE LA METHODE AU SEPARATEUR HYDRODYNAMIQUE

L'adaptation d'une technique *upscaling* à notre cas d'étude consiste en (*Figure 98*) :

- une modélisation à petite échelle : il s'agit d'utiliser une approche déterministe de l'écoulement à l'échelle de l'orifice de la grille ; ceci n'est possible qu'en restreignant la modélisation à une surface réduite de grille.
- une modélisation conceptuelle de la grille à grande échelle : il s'agit de modéliser la grille à l'aide d'une approche de type milieu poreux pour reproduire son comportement à l'échelle de l'ouvrage et diminuer le maillage.



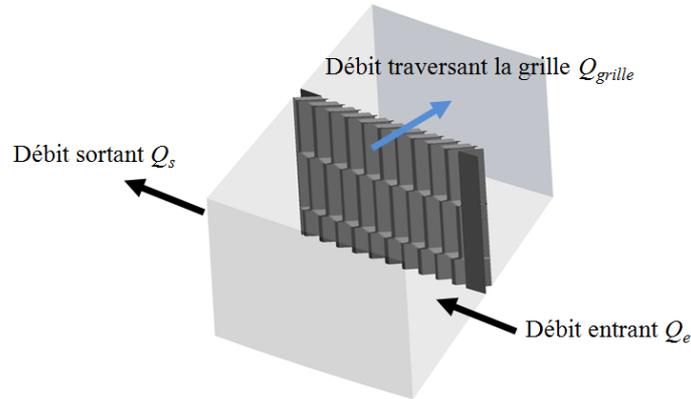
*Figure 98. Approche multi-échelle pour la modélisation 3D de l'ouvrage : modèle local (à gauche) et modèle global (à droite)*

Ces deux modèles auront donc des objectifs différents. Le modèle local devra mettre en avant l'influence de la géométrie de la grille sur l'écoulement et les phénomènes physiques à proximité immédiate de la grille. L'objectif du modèle global est de reproduire l'écoulement à l'échelle de l'ouvrage, en utilisant une approche conceptuelle de grille. Cette approche nécessite un calage. Notre objectif étant de reproduire les pertes de charge provoquées par la grille, il est nécessaire de les déterminer à partir du modèle local.

### 2.1 Détermination du coefficient de calage

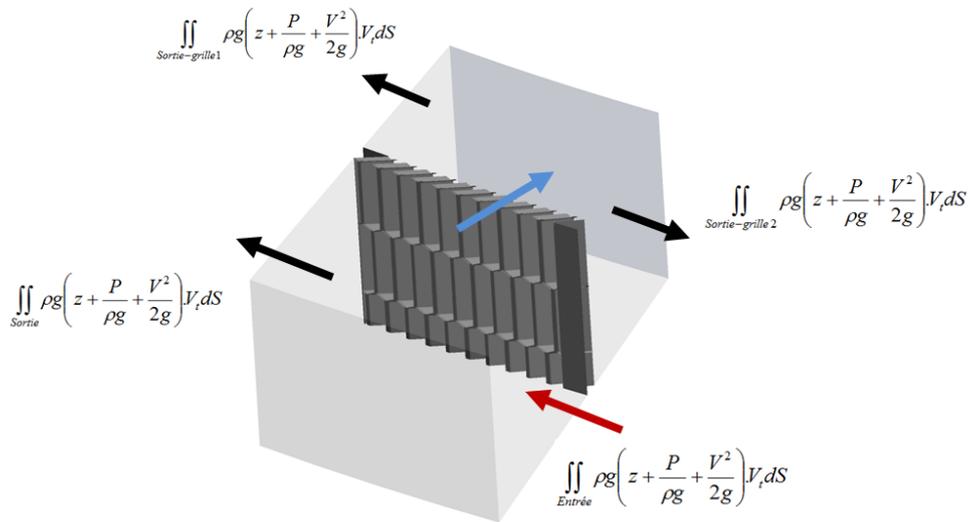
Le calcul des pertes de charge de la grille ne peut pas se faire de manière classique, à savoir une différence de charge entre l'amont et l'aval de la singularité. L'écoulement étant tangentiel à la grille, nous devons injecter le débit de manière tangentielle (*Figure 99*). Il en va de même pour la sortie du

modèle. Ce débit de sortie est calculé pour assurer le bon passage de débit à travers la grille (voir la description des conditions aux limites dans *Partie 3 II*).



**Figure 99. Répartition des débits dans le modèle local**

En utilisant de telles conditions, l'ensemble du débit injecté ne traverse pas la grille. Etant donné qu'il n'y a pas conservation du débit, nous devons utiliser un bilan de puissance. La détermination de la puissance sur chaque face (*Figure 100*) permet à partir d'un bilan de calculer la perte énergétique provoquée par la grille.



**Figure 100. Principe des puissances pour la détermination des pertes de charge**

En effet, ce bilan de puissance, donné par l'équation (15), permet de calculer la perte de puissance provoquée par la grille.

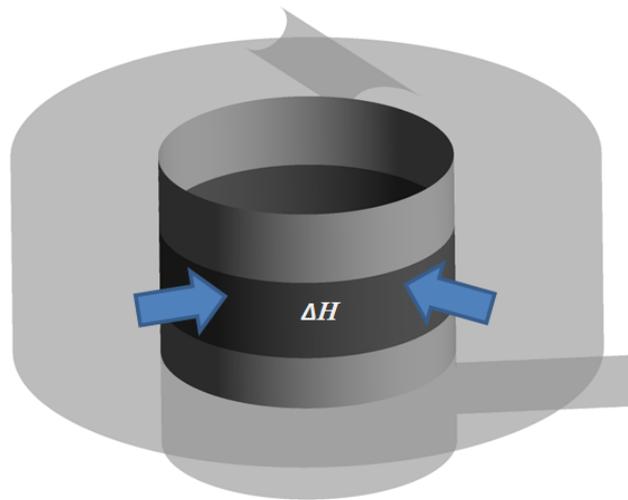
$$\iint_{Entrée} \rho g \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right) V_i dS - \iint_{Sortie} \rho g \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right) V_i dS - \iint_{Sortie-grille} \rho g \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right) V_i dS = \rho g \Delta H Q \quad (15)$$

avec  $\rho$  la masse volumique,  $g$  la gravité,  $z$  la cote altimétrique,  $P$  la pression,  $V$  la vitesse normale,  $V_t$  la vitesse tangentielle à la surface,  $Q$  le débit traversant la grille et  $\Delta H$  la perte de charge.

$$\Delta H = \frac{\iint_{\text{Entrée}} \rho g \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right) V_t dS - \iint_{\text{Sortie}} \rho g \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right) V_t dS - \iint_{\text{Sortie-grille}} \rho g \left( z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right) V_t dS}{\rho g Q} \quad (16)$$

Une fois la perte de charge déterminée à l'aide du modèle local, l'idée est d'injecter et reproduire cette perte au sein d'un milieu poreux (*Figure 101*).

## 2.2 Calage de la grille conceptuelle



*Figure 101. Calage de la grille dans le modèle global*

L'étude bibliographique a montré l'existence de formulations permettant de reproduire les écoulements turbulents au sein des milieux poreux. Le code de calcul utilisé dans cette thèse permet de modéliser les écoulements à travers des milieux poreux en utilisant une formulation telle que montré avec l'équation (17). Cette approche permet d'introduire un terme source composé d'une composante visqueuse et d'une composante de perte inertielle (Ansys, 2012).

$$S_i = -\left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_i \right) \quad (17)$$

avec  $S_i$  le terme source à l'instant  $i$ ,  $\mu$  la viscosité cinématique,  $\alpha$  la perméabilité,  $C_2$  le facteur de résistance inertielle,  $\rho$  la masse volumique,  $v_i$  la vitesse à l'instant  $i$  et  $v_{mag}$  la vitesse normale dans la cellule de calcul.

En faisant l'hypothèse que l'écoulement n'est pas laminaire dans les orifices, on peut supprimer la composante visqueuse en utilisant un large coefficient de perméabilité ( $\alpha = 10^{-20} \text{ m}^{-1}$ ). Le terme source peut s'écrire à partir de l'équation (18) :

$$S_i = -\left(\frac{K}{\Delta m} \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_i\right) \quad (18)$$

avec

$$\frac{K}{\Delta m} = C_2 \quad (19)$$

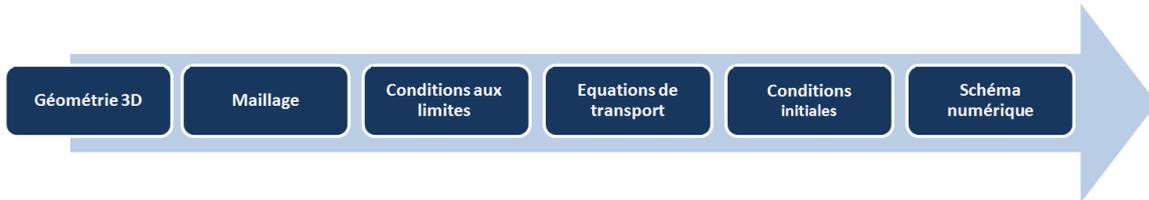
où  $\Delta m$  représente l'épaisseur de la grille et  $K$  le coefficient de perte de charge de la grille tel que :

$$K = \Delta H \frac{2g}{\left(\frac{Q_{grille}}{S_{grille}}\right)^2} \quad (20)$$

où  $\Delta H$  la perte de charge calculée dans le modèle local,  $Q_{grille}$  le débit de passage à travers la grille et  $S_{grille}$  la surface de la grille.

## II. DESCRIPTION DES MODELES

Les modèles sont obtenus en utilisant le protocole de la *Figure 102*.



*Figure 102. Organisation de la modélisation 3D*

La première étape consiste à reproduire la géométrie du modèle afin de permettre sa discrétisation spatiale. Les conditions aux limites sont ensuite décrites dans l'objectif de reproduire les conditions aux frontières du modèle. Suivent ensuite les différentes équations de transport permettant de reproduire les écoulements (équations de Navier-Stokes avec modèle de turbulence, ajout d'un terme source,...). Les conditions initiales permettent quant à elles de définir les variables lors du lancement de la simulation. Ces conditions sont généralement choisies pour faciliter la convergence du calcul. Enfin, les schémas numériques représentent la façon dont les équations différentielles sont écrites algébriquement pour permettre la résolution du système.

Une description complète des méthodes numériques est présentée en *Annexe B*.

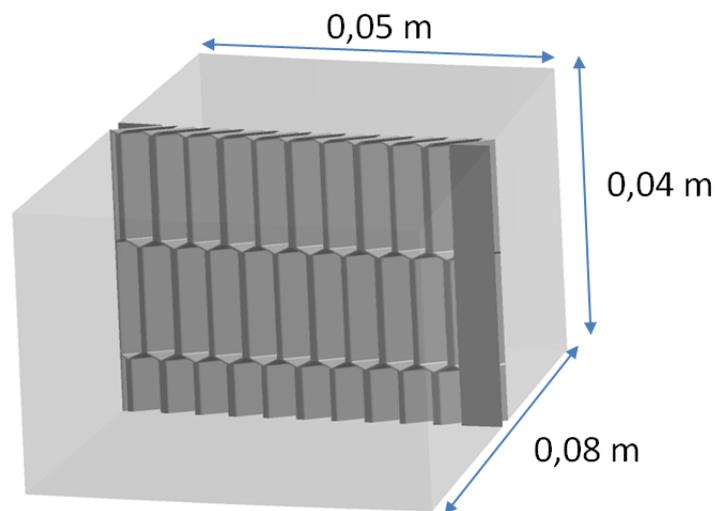
### 1. MODELE LOCAL - A L'ECHELLE DE LA GRILLE

Le modèle à l'échelle de la grille, ou modèle local, a été construit pour étudier l'ensemble des phénomènes physiques se produisant à proximité des orifices de la grille. L'objectif de ce modèle est d'observer la distribution des vitesses ainsi que les phénomènes de turbulence à proximité de la grille et au niveau de l'entrefer. L'utilisation de ce modèle devrait également permettre de mieux comprendre l'influence des phénomènes physiques sur le transport solide.

#### 1.1 Géométrie et maillage

La taille de la portion de grille est choisie en fonction des résultats que l'on cherche à observer. Nous avons choisie une géométrie représentant une trentaine d'orifices pour nous assurer d'un établissement des phénomènes physiques tout en augmentant la précision des calculs (comme par exemple le calcul des pertes de charge). D'autre part, un domaine trop important aboutit à un maillage très dense et contraint la durée de calcul.

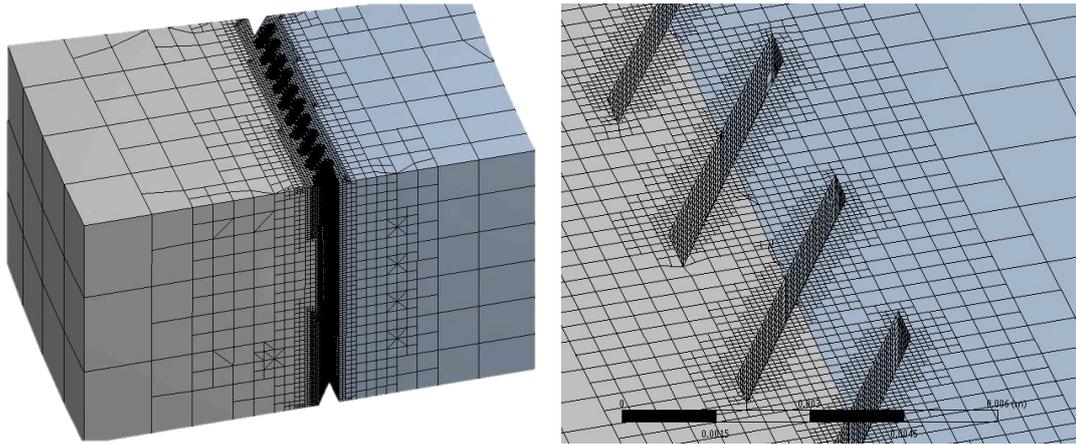
Le maillage va ainsi conditionner la taille du domaine. L'approche *Cut-cell Meshing*, permettant d'obtenir des mailles hexaédriques, couplée avec la fonction "*Proximity & Curvature*" (Ansys, 2012) a été utilisée de manière à affiner le maillage au niveau des orifices (*Figure 104*). Des mailles très fines ont été utilisées, notamment à proximité des orifices dans le but de calculer directement l'écoulement dans la couche limite (voir *Annexe B*). D'autre part, les simulations réalisées avec une approche *LES* nécessitent des contraintes sur le maillage. Ainsi, la taille des plus petites mailles détermineront la taille du filtre. La taille des mailles ainsi définie dans le *Tableau 15* permet de discrétiser la zone de l'entrefer avec 25 mailles et d'obtenir au total 2 500 000 cellules dans un volume relativement petit (*Figure 103*). Ce volume représente un angle de 5° de la grille et permet d'observer les phénomènes physiques 3 cm de part et d'autre de la grille. Notons également que le rayon de courbure de la grille est de 0,5 m (correspondant à la grille du pilote expérimental).



*Figure 103. Dimensions de la géométrie du modèle local*

	<b>Maillage</b>
Nombre de cellules	2 500 000
Taille min maille (m)	$10^{-4}$
Taille max maille (m)	$10^{-2}$

*Tableau 15. Caractéristique du maillage pour le modèle local*



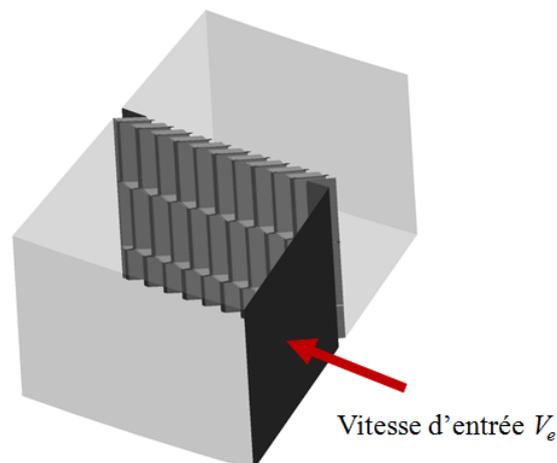
*Figure 104. Maillage du modèle local avec la méthode "Cut-cell" et affinage au niveau des orifices*

## 1.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites représentent les conditions physiques aux frontières du domaine étudié. Dans notre cas, les principales conditions aux limites utilisées sont des conditions d'entrée, de sortie et de parois.

### Conditions en entrée

En entrée, une vitesse  $V_e$  (*velocity inlet*) correspondant à la vitesse tangentielle à proximité de la grille est imposée (*Figure 105*).



*Figure 105. Conditions aux limites en entrée dans le modèle local*

La turbulence est également à renseigner aux niveaux des limites. Des lois empiriques sur l'intensité turbulente sont généralement utilisées pour cela. L'objectif n'est pas de bien reproduire la turbulence au niveau de la condition limite mais d'être suffisamment proche de la réalité pour que la turbulence

soit bien reproduite à l'endroit où on cherche les résultats au sein du domaine. Ainsi, l'intensité turbulente est calculée à partir de l'équation (21).

$$I = 0,16 \text{Re}^{-1/8} \quad (21)$$

avec 
$$\text{Re} = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (22)$$

où  $U$  est la vitesse,  $D_h$  le diamètre hydraulique,  $\mu$  la viscosité dynamique et  $\rho$  la masse volumique.

### Conditions en sortie

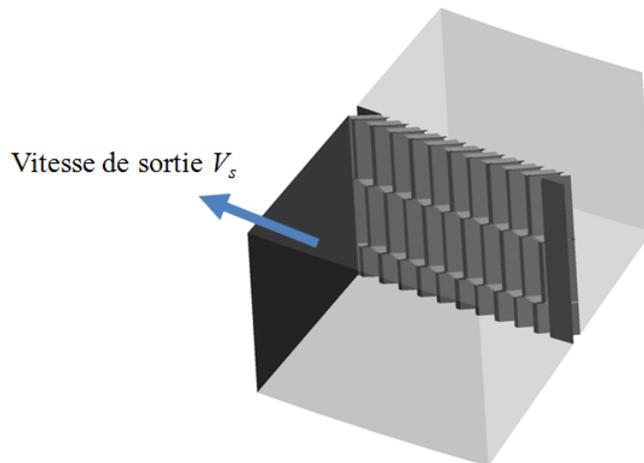
En sortie (*Figure 106*), une vitesse négative  $V_s$  permet d'imposer le débit  $Q_{grille}$  traversant la grille. Ce débit est obtenu en divisant le débit total  $Q_{nominal}$  qui devrait passer à travers la surface complète  $S$  de la grille, divisé par la proportion de grille modélisée  $S_{grille}$  (équation 23). Ce prorata revient à faire l'hypothèse d'une équi-répartition du débit sur l'ensemble de la grille, ou encore d'un comportement moyen au niveau de la grille.

$$Q_{grille} = \frac{Q_{nominal} \times S_{grille}}{S} \quad (23)$$

La différence entre le débit d'entrée  $Q_e$  et le débit transitant par la grille  $Q_{grille}$ , correspondant au débit de sortie  $Q_s$ , permet de calculer la vitesse de sortie  $V_s$  (équation 24).

$$V_s = \frac{Q_s}{S_s} \quad (24)$$

où 
$$Q_s = Q_e - Q_{grille} \quad (25)$$



**Figure 106. Conditions aux limites en sortie dans le modèle local**

Des conditions de type "outflow" sont imposées sur les sorties à l'intérieur de la grille de manière à évacuer la masse d'eau transitant par la grille (Figure 107). Cette condition est également utilisée lorsque les valeurs des pressions sont inconnues. (Ansys, 2012).

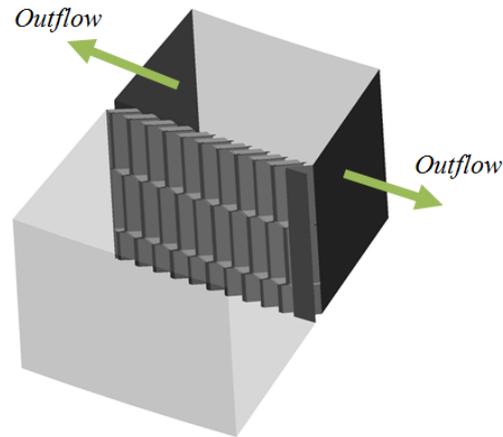


Figure 107. Conditions aux limites en sortie de grille dans le modèle local

### Conditions de symétrie

Pour les autres faces, des conditions de symétrie sont utilisées. Cette condition se justifie par le fait que l'écoulement autour de la grille est principalement tangentiel à la grille. D'autre part, la grille étant immergée, nous ne sommes pas obligés d'utiliser un modèle *VOF* pour reproduire la surface libre. Le modèle local n'utilise qu'une seule phase eau. Ce caractère monophasique permet ainsi de converger plus rapidement vers la solution.

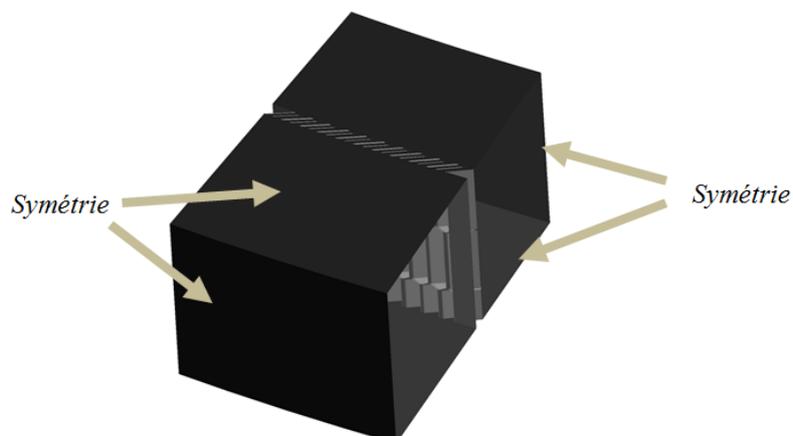
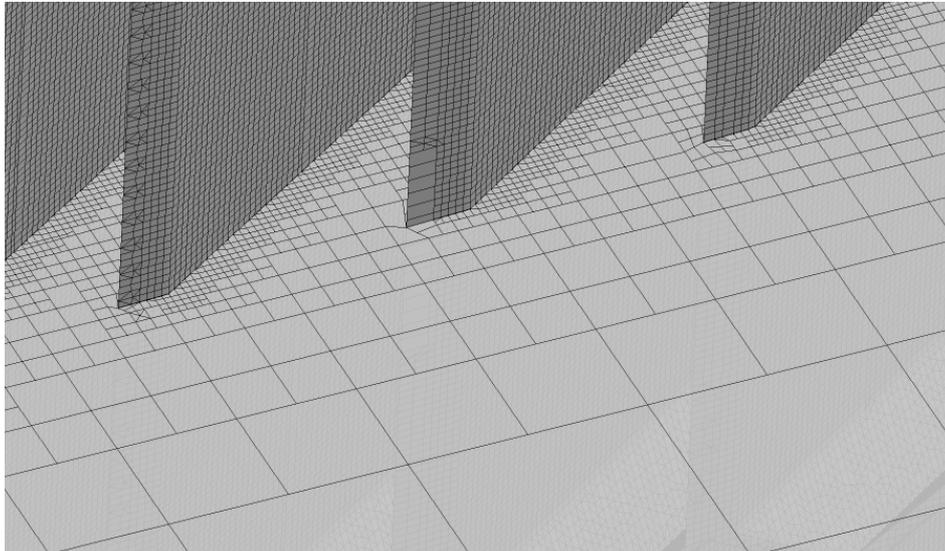


Figure 108. Conditions aux limites en sortie de grille dans le modèle local

## Conditions aux parois

Le modèle local doit nous permettre de visualiser l'influence de la forme de la grille sur l'écoulement. Ainsi, pour modéliser finement l'écoulement au sein de la couche limite, nous utiliserons une *Near Wall Model*, qui suscite l'utilisation d'un  $y^+$  proche de 1 (voir *Annexe B*). Cette approche conditionne le maillage en région proche paroi. En effet, l'obtention de cette condition se fait en utilisant un maillage très fin (*Figure 109*).



*Figure 109. Conditions aux limites à la paroi dans le modèle local*

## 1.3 Modélisation de la turbulence

La modélisation de la turbulence est un aspect important à prendre en compte. La bibliographie nous a montré l'existence de nombreux modèles permettant de reproduire la turbulence. Ces modèles, décrits en partie dans l'*Annexe B*, sont plus ou moins complexes. Cette complexité entre les modèles se justifie d'une part par le fait qu'il n'existe aucun modèle universel et d'autre part par le fait que les écoulements sont bien souvent complexes. Ainsi, le choix d'un modèle dépendra des phénomènes que l'on souhaite mettre en avant. Pour l'étude de l'écoulement à proximité de la grille, différents modèles peuvent être utilisés. Dans le cas d'une approche *RANS*, nous pourrions utiliser les modèles de turbulences isotropes  $k-\varepsilon$  ou  $k-\varepsilon RNG$  pour reproduire des écoulements tridimensionnels. Cependant, l'utilisation d'un modèle *RSM* est *a priori* plus à même à reproduire les phénomènes anisotropes pouvant se produire à proximité de la grille. La résolution des contraintes de Reynolds permet par exemple de reproduire avec plus de précision les phénomènes de recirculations. Ce modèle a l'inconvénient d'engendrer un temps de calcul plus important. Par conséquent, une analyse de sensibilité sur les modèles de turbulence sera effectuée pour permettre de juger le modèle le plus adapté à notre problème.

D'autre part, une approche *LES* peut être envisagée notamment pour visualiser les phénomènes instationnaires. Cette technique beaucoup plus lourde possède aussi l'avantage de ne pas faire appel à un modèle de turbulence. De ce fait, cette méthode gère mieux les transitions de régimes et permettrait par exemple de modéliser le passage d'un régime hydraulique très turbulent à l'extérieur de la grille à un régime peu turbulent voir laminaire dans l'entrefer. Dans ce cadre, la comparaison entre une approche *LES* et une approche *RANS* permettrait de remettre en question l'influence d'un modèle de turbulence.

Une confrontation des différents modèles de turbulence permettra de choisir l'approche la plus intéressante pour modéliser les phénomènes que l'on souhaite reproduire.

### **1.4 Conditions initiales**

Nous utiliserons comme condition initiale le résultat obtenu avec le modèle correspondant au niveau d'approximation en dessous : lorsque le modèle *RSM* est utilisé, nous choisirons comme condition initiale les résultats obtenus avec le modèle *k-ε*. De même, les résultats obtenus avec le modèle *RSM* serviront de point de départ à une simulation en *LES*.

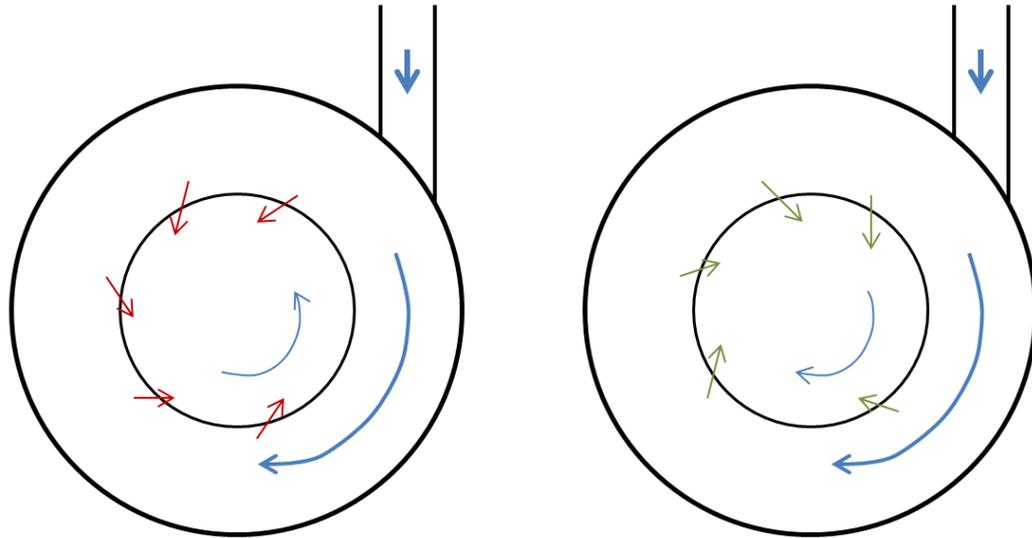
### **1.5 Schémas numériques**

Les différents schémas numériques décrits en *Annexe B* et utilisés pour le modèle local sont des schémas du second ordre. Pour éviter la divergence du calcul en raison des fortes variations de pression possibles, nous utiliserons un schéma *PRESTO* (Ansys, 2012).

Pour les simulations en *LES*, nous utiliserons un schéma *Bounded Central Differencing*. Ce schéma est recommandé pour les calculs en *LES* car il permet d'éviter la diffusion numérique (Ansys, 2012).

## **2. MODELE GLOBAL - A L'ECHELLE DE L'OUVRAGE**

Le modèle à l'échelle de l'ouvrage, doit permettre de reproduire le comportement global dans l'ouvrage en utilisant une approche conceptuelle de la grille. Par conséquent, la grille conceptuelle doit permettre de reproduire les effets de la grille visible à l'échelle globale. L'étude expérimentale nous a montré que la forme de la grille avait deux effets visibles à l'échelle globale : les pertes de charge et la direction de l'écoulement. En effet, suivant la géométrie des orifices, l'écoulement dans la partie centrale est soit inversé soit dans le même sens par rapport à l'écoulement tangentielle à l'extérieur de la grille. Par conséquent, l'approche conceptuelle doit permettre de reproduire ce phénomène (*Figure 110*).



Ecoulement avec une grille de type métal déployé

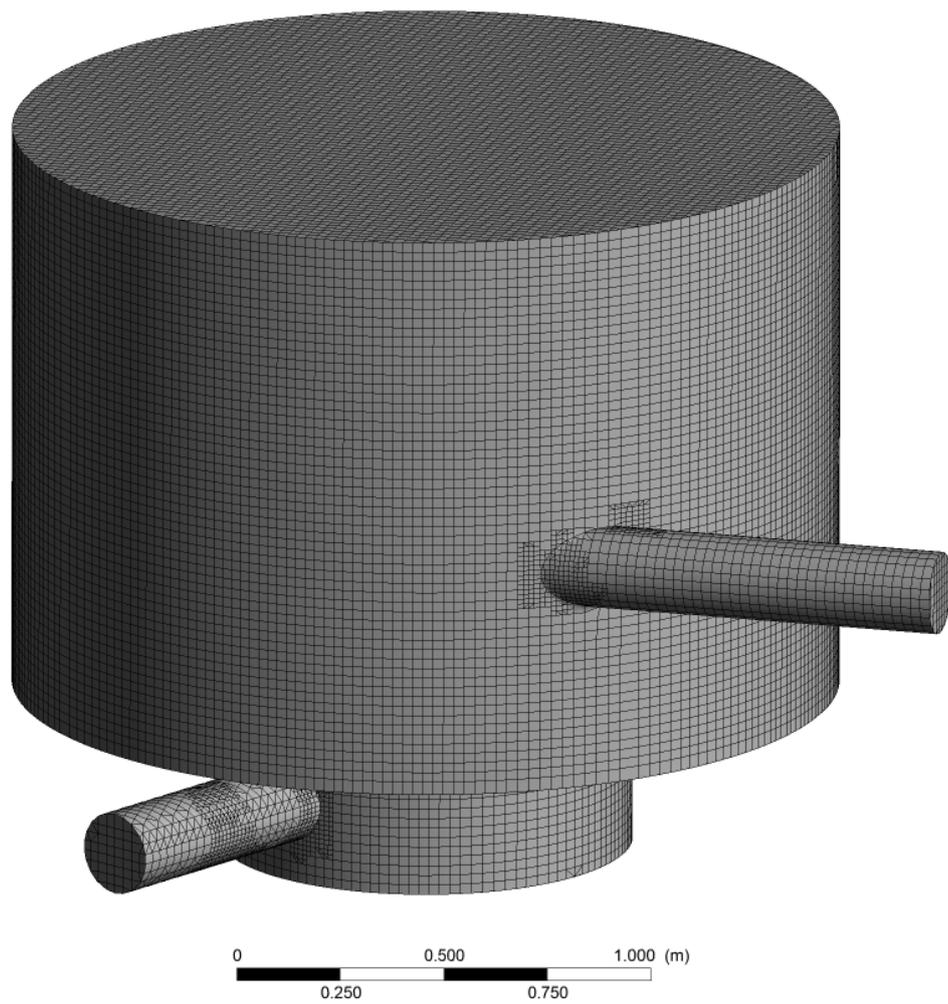
Ecoulement avec une plaque perforée

Figure 110. Résultats recherchés dans le cadre de l'approche conceptuelle de grille dans le modèle globale

## 2.1 Géométrie et maillage

La géométrie du modèle global représente fidèlement le pilote expérimental (Figure 111). Cependant, dans l'objectif de modéliser l'écoulement à surface libre, la hauteur de l'ouvrage a volontairement été augmentée de 0,5 m de manière à simuler l'écoulement d'air dans la partie supérieure de l'ouvrage et limitant ainsi le risque de divergence du calcul lié à des sorties d'eau par le haut. Ce modèle sera donc qualifié de multiphasique et nécessite l'application d'un modèle *VOF*. L'utilisation d'une méthode *VOF* permettra d'observer l'influence du milieu poreux sur les hauteurs d'eau, en particulier sur la différence de niveau entre l'extérieur et la partie centrale de l'ouvrage. En effet, on a remarqué dans la bibliographique que les auteurs avaient souvent recourt à une symétrie pour définir la surface libre. Cette approche n'est pas possible dans le cas dans notre ouvrage, étant données les différences de hauteurs qui peuvent subsister entre l'amont et l'aval de la grille. Pour en revenir à la géométrie, le diamètre extérieur est donc de 2 m pour 1,4 m de haut (dont 0,5 m pour la colonne d'air).

Une analyse de sensibilité au maillage a été effectuée pour ce modèle. Trois maillages ont été construits en utilisant l'approche "*Cut-cell Meshing*" et la fonction "*Proximity & Curvature*" (Ansys, 2012). Les caractéristiques des maillages sont décrites dans le *Tableau 16*.



*Figure 111. Maillage 2 du modèle global*

	<b>Maillage 1</b>	<b>Maillage 2</b>	<b>Maillage 3</b>
Nombre de cellules	2 800 000	1 300 000	360 000
Taille min maille (m)	$7 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-4}$
Taille max maille (m)	0,012	0,02	0,024

*Tableau 16. Caractéristiques des différents maillages testés pour le modèle global*

## 2.2 Conditions aux limites

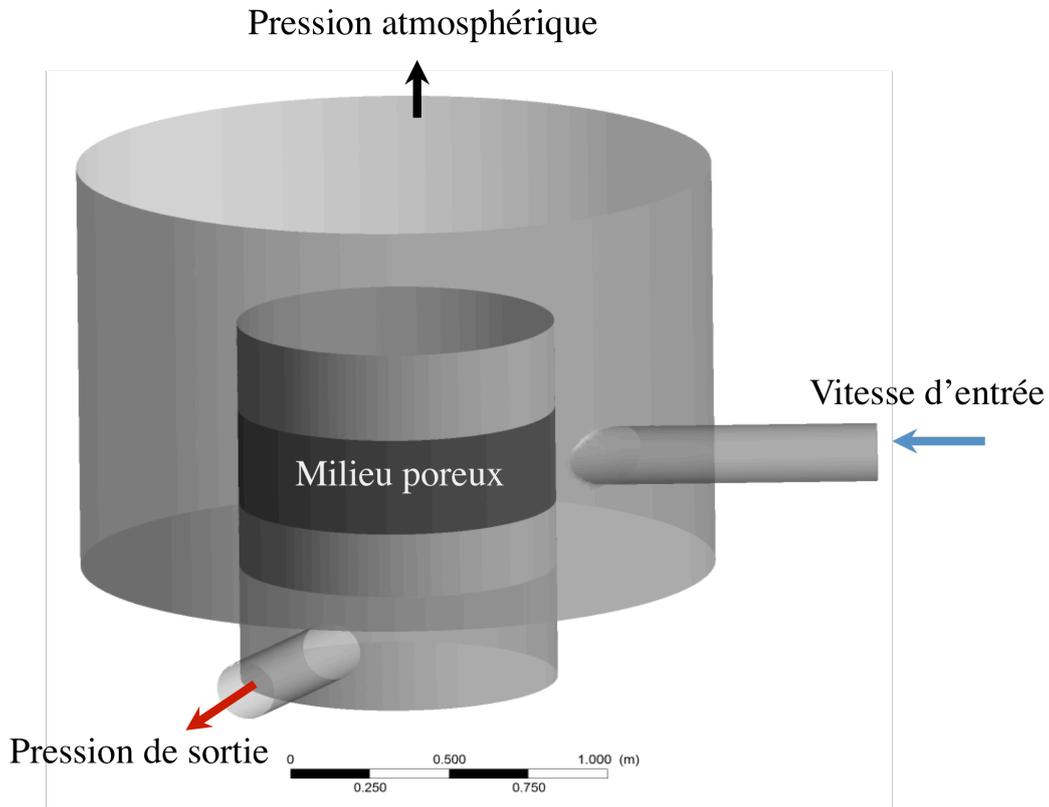


Figure 112. Conditions aux limites dans le modèle global

### Conditions en entrée

En entrée, une vitesse d'écoulement (*velocity inlet*) est imposée sur l'ensemble de la section de façon à imposer un débit. On choisit une vitesse uniforme sur toute la section d'entrée. De la même manière que pour le modèle local, le diamètre hydraulique  $D_h$  ainsi que l'intensité turbulente  $I$  sont introduits.

### Conditions en sortie

En sortie, une pression (*pressure outlet*) permet d'ajuster le niveau d'eau dans la zone extérieure de la grille (70 cm). Précisons que la pression imposée n'est pas nulle mais correspond à la hauteur d'eau (pression hydrostatique) dans la partie centrale de l'ouvrage.

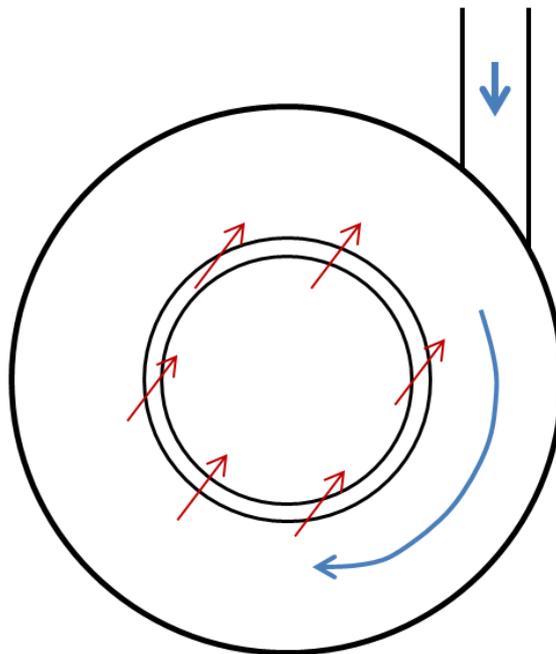
Une condition de pression atmosphérique est appliquée sur le toit pour évacuer le flux d'air présent dans le domaine.

### Conditions de porosité pour la grille

Concernant l'approche conceptuelle de grille, deux méthodes sont possibles avec le code de calcul utilisé. La méthode que l'on a retenue pour modéliser l'écoulement à travers le milieu poreux est la condition "*porous jump*" (Ansys, 2012).

L'avantage de cette méthode concerne sa simplicité à mettre en œuvre. Une condition de porosité (*porous jump*) est directement imposée sur la surface symbolisant la grille. Le solveur va ensuite intégrer le terme source  $S_i$  pour reproduire la perte énergétique entre les deux premières mailles situées de part et d'autre de la grille. Cette condition nécessite de connaître l'épaisseur du milieu poreux et le coefficient de perte de charge de la grille, comme indiqué dans l'équation (18). Cependant, cette condition ne permet pas d'orienter le flux dans le milieu poreux pour obtenir par exemple un écoulement inverse dans la partie centrale (cas d'une grille à métal déployé).

Pour orienter le flux dans un milieu poreux, nous devons passer par la seconde approche qui consiste à modéliser la grille par un volume. Le fait d'utiliser un volume permet de définir des directions préférentielles. En effet, les facteurs de résistance visqueuse et inertielle peuvent être définis suivant les axes  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  avec une direction particulière dans l'espace cartésien. Cette approche est intéressante pour reproduire l'écoulement en sens opposé dans la partie interne dans le cas d'une grille de type métal déployé (à gauche dans la *Figure 110*). Plusieurs tests ont été réalisés en utilisant cette approche mais ces derniers étaient loin d'être satisfaisants. En effet, nous n'avons pas réussi à transposer le problème à un repère cylindrique. La direction de l'écoulement obtenue était unidirectionnelle comme illustré sur la *Figure 113*.



*Figure 113. Ecoulement à travers le milieu poreux obtenu avec la méthode volumique*

## Conditions aux parois

Une loi de paroi semi-empirique est utilisée pour modéliser l'écoulement au sein de la couche limite : la loi de paroi standard. Cette approche permet de s'affranchir d'un maillage très fin à proximité des parois.

## 2.3 Modélisation de la turbulence

L'étude bibliographique a montré que le modèle le plus propice à reproduire les écoulements tourbillonnaires et rotationnels est le modèle RSM. Cependant, les modèles isotropes déjà discutés auparavant ont déjà été validés sur des séparateurs hydrodynamiques. De manière analogue au modèle local, une analyse de sensibilité permettra de conclure sur le modèle permettant de reproduire au mieux les phénomènes physiques à observer, en particulier les profils de vitesse et la surface libre.

## 2.4 Conditions initiales

A l'instant initial, le caractère multiphasique du modèle nous contraint à renseigner la position de l'interface entre l'eau et l'air. Au lancement de chaque calcul, un "patch" permet de donner la valeur 1 à l'ensemble des cellules situées sous le niveau d'eau, et la valeur 0 aux cellules situées dans l'air. Cet état initial permet de converger beaucoup plus rapidement vers la solution finale en s'affranchissant notamment du remplissage du bassin.

Les coefficients de sous relaxation sont choisis très faibles lors du démarrage (0,05) puis sont augmentés au bout d'une centaine d'itérations (0,1). Pour éviter la divergence du calcul, les coefficients ne dépassent jamais la valeur de 0,1.

Concernant les modèles de turbulence, nous utiliserons la même méthode que pour le modèle local. Le résultat obtenu avec le modèle  $k-\varepsilon$  est par la suite utilisé pour initialiser le calcul avec un modèle *RSM*, et le résultat après convergence avec le modèle *RSM*.

## 3. MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE

La modélisation de transport solide la plus courante dans les ouvrages en assainissement consiste à utiliser une approche lagrangienne. L'autre terme utilisé pour qualifier cette approche est le suivi de particules. Cette technique, décrites en *Annexe B*, répond tout à fait à nos attentes car notre objectif n'est pas de modéliser des concentrations mais plutôt d'observer la trajectoire des particules dans l'ouvrage et l'influence de la grille sur ces trajectoires.

L'utilisation de l'approche multi-échelle est néanmoins problématique pour étudier l'efficacité de l'ouvrage à retenir les particules. En effet, la grille modélisée par un milieu poreux ne permet pas de reproduire les effets de contact entre les particules et la grille. De ce fait, c'est uniquement l'écoulement à proximité de la grille qui conditionne si une particule traverse la grille ou non. Cependant, l'utilisation du suivi de particules permettra d'observer l'influence des caractéristiques des particules sur leurs trajectoires dans l'ouvrage.

Le modèle local montre également des limites par rapport à la modélisation du transport solide. Si le modèle déterministe permet d'effectuer un bilan classique d'efficacité (entrée/sortie), le modèle ne permet pas de prendre en compte le fait qu'une particule puisse effectuer plusieurs tours avant de traverser la grille. En réalité, lorsqu'une particule entre dans l'ouvrage et qu'elle tourne autour de la grille, soit elle finit par décanter, soit elle continue de tourner. Si ce deuxième cas est avéré, nous avons toutes les raisons de penser que la particule finira par traverser la grille si l'événement pluvieux dure suffisamment longtemps. Le modèle local peut tout de moins être utilisé pour étudier l'influence des phénomènes physiques sur la trajectoire des particules.

### 3.1 A l'échelle de la grille

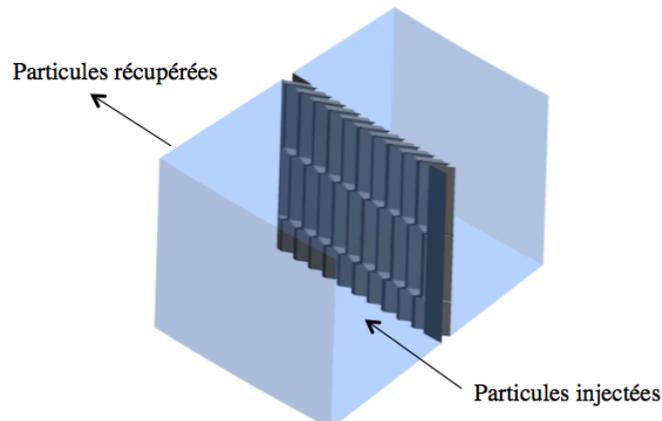
L'utilisation d'une approche lagrangienne à partir de l'écoulement à proximité de la grille nous permet :

- de visualiser l'influence des phénomènes physiques sur la trajectoire des particules
- de tester différentes caractéristiques de particules pour déterminer la sensibilité des particules face aux phénomènes
- d'étudier l'influence du débit sur l'efficacité de séparation

Dans la thèse, le terme "efficacité" de séparation de la grille sera tout de même utilisé pour estimer la part de particules retenues à travers un bilan entrée/sortie (illustré sur la *Figure 114*). Cette efficacité est calculée à partir de l'équation (26).

$$\text{Efficacité Grille} = \text{Particules récupérées} / \text{Particules injectées} \times 100 \quad (26)$$

L'injection des particules s'effectue sur la section d'entrée, à la même vitesse que l'écoulement. Environ 15000 particules uniformément réparties sur la surface d'entrée sont injectées. Ce nombre a été choisi après avoir réalisé des tests préliminaires sur la sensibilité du nombre de particules en entrée. Une condition de type "*escape*" permet de quantifier les particules en sortie. Différentes propriétés granulométriques des particules peuvent être renseignées. La modification par exemple de la masse volumique et/ou du diamètre des particules permettra de tester des particules représentant au mieux celles trouvées en réseau d'assainissement pluvial.



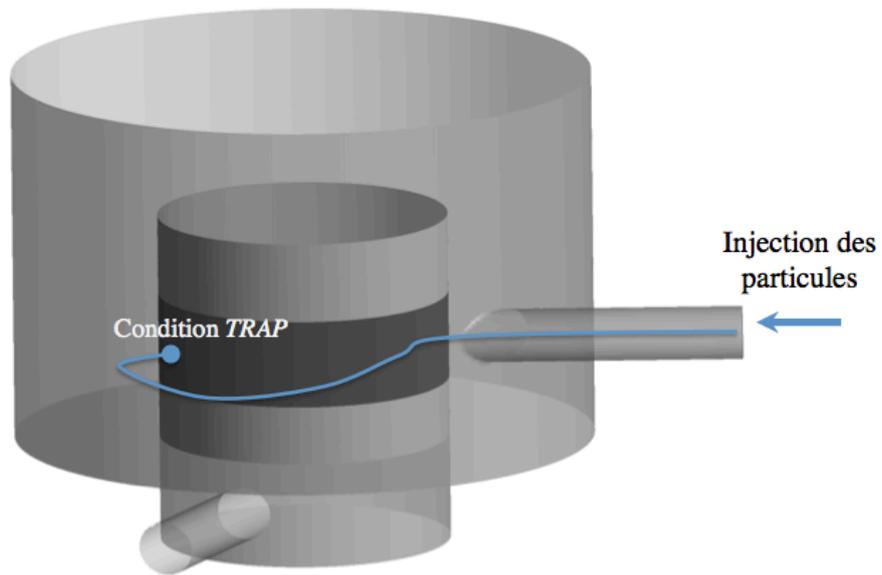
*Figure 114. Illustration du bilan entrée/sortie du transport solide dans le modèle local*

### **3.2 A l'échelle de l'ouvrage**

Le modèle à l'échelle de l'ouvrage peut être utilisé dans l'objectif de déterminer par exemple les phénomènes de sédimentation dans le pilote, d'observer celles qui sont sensibles à l'écoulement, celles qui sont directement dirigées vers la grille, etc.

De la même manière que dans le modèle local, les particules sont injectées en entrée, à la même vitesse que l'écoulement. En revanche, face à la problématique liée à la grille, nous avons choisi d'utiliser une condition "trap" pour le milieu poreux (Figure 115). Cette condition est choisie pour quantifier le temps de séjour de la particule avant contact avec la grille. En effet, si l'analyse de la trajectoire résulte de l'observation, il est plus difficile de quantifier le transport solide dans l'ouvrage. Ainsi, le temps de séjour des particules permettra de déterminer les phénomènes de sédimentation (ces temps de séjours seront donc infinis) mais il permettra surtout de calculer la sensibilité des particules avec l'écoulement. La comparaison entre les temps de séjour des particules et le temps de séjour hydraulique permettra de déterminer si les particules sont majoritairement pilotées par l'hydrodynamique ou non.

Notons également le fait que ce modèle permettra de valider, qualitativement, l'approche lagrangienne en comparant les trajectoires des particules de mêmes caractéristiques que celles utilisées lors des expériences en laboratoire.



*Figure 115. Illustration de la condition "trap" permettant de capturer une particule sur une paroi*

## CONCLUSION DE LA PARTIE 3

L'objectif de ce chapitre était de présenter la méthodologie multi-échelle permettant de modéliser les différents phénomènes physiques au sein de l'ouvrage. L'approche multi-échelle décrite dans cette partie consiste à utiliser deux modèles.

Un modèle à l'échelle de la grille permettant de modéliser l'écoulement à proximité immédiate des orifices a été construit. Un maillage très fin va permettre de modéliser l'écoulement dans la couche limite pour prendre en compte les effets de la forme des orifices sur l'écoulement. L'utilisation d'un bilan de puissance pour calculer les pertes de charge de la grille va permettre de caler la grille conceptuelle de type milieu poreux du modèle à l'échelle de l'ouvrage. En effet, pour s'affranchir d'un maillage trop dense, la grille est remplacée par un milieu poreux. Ce milieu poreux doit permettre de reproduire les pertes de charge provoquées par la grille.

Nous avons également remarqué les limites de l'approche multi-échelle pour un ouvrage de ce type. La première concerne le modèle local. En effet, étant donné l'utilisation d'une portion de grille, nous pouvons ne pas reproduire le fait que l'écoulement tourne continuellement autour de la grille. Les conditions aux limites calculées ne permettent que de reproduire un comportement moyen. Concernant le modèle global, l'utilisation de la porosité inclinée n'a pas pu être mise en place dans notre cas d'étude.

L'utilisation d'une approche lagrangienne du transport solide est envisagée dans cette thèse. En raison de l'application d'une approche multi-échelle, l'efficacité de l'ouvrage à retenir des particules ne pourra pas être déterminée par une approche numérique. La grille, étant modélisée par un milieu poreux, ne pourra pas reproduire les effets de contact entre la grille et les particules. Ce modèle permettra en revanche d'étudier les trajectoires des particules au sein de l'ouvrage. Par ailleurs, le modèle local permettra d'observer l'influence de la forme de la grille sur la trajectoire des particules à l'échelle des orifices.



# PARTIE 4

## VALIDATION DE LA METHODE NUMERIQUE

---

<b>Introduction de la partie 4 .....</b>	<b>142</b>
<b>I. Comportement hydrodynamique à l'échelle de la grille .....</b>	<b>143</b>
1. Confrontation des modèles de turbulence .....	144
2. Comparaison entre le modèle <i>RSM</i> et les données expérimentales .....	150
2.1 Champs de vitesse .....	150
2.2 Pertes de charge de la grille.....	152
3. Description des phénomènes physiques à proximité de la grille .....	153
3.1 Champ de pression .....	153
3.2 Energie cinétique turbulente.....	154
4. Etude en régime instationnaire.....	155
4.1 Comparaison entre LES et RANS-RSM .....	156
4.2 Fluctuations des vitesses au cours du temps .....	158
5. Etude de l'influence du débit.....	159
<b>II. Comportement hydraulique à l'échelle de l'ouvrage.....</b>	<b>162</b>
1. Evaluation de l'incertitude numérique .....	163
2. Confrontation des modèles de turbulence.....	166
3. Comparaison avec l'expérimental (débit nominal) .....	168
3.1 Ecoulement.....	168
3.2 Champ de vitesse.....	169
3.3 Surface libre .....	171
3.4 Influence du débit sur le champ de vitesse.....	173
3.5 Influence du débit sur la surface libre .....	174
<b>III. Transport solide .....</b>	<b>177</b>
1. Etude du transport solide à proximité de la grille .....	177
1.1 Caractéristiques des particules .....	177
1.2 Analyse de l'efficacité de séparation de la grille .....	177
1.3 Influence du débit sur l'efficacité de séparation .....	182
2. Etude du transport solide dans le pilote .....	184
2.1 Simulation de la trajectoire des particules utilisées pour les expérimentations .....	184
2.2 Etude du temps de séjour des particules.....	186
2.3 Trajectoires des particules et étude des processus de sédimentation .....	188
2.4 Influence du débit sur le transport solide .....	189
<b>Conclusion de la partie 4 .....</b>	<b>191</b>

## INTRODUCTION DE LA PARTIE 4

Cette partie est consacrée à la validation de l'approche multi-échelle et des différents modèles numériques. La confrontation des résultats obtenus via la modélisation avec l'expérimental permettra de conclure quant à la validité de cette approche.

La première partie consiste à observer l'écoulement dans les deux modèles. Le modèle local représentant la portion de grille permettra d'analyser plus en détails l'influence des bandelettes de métal sur l'écoulement. Les champs de vitesse, de pression et d'énergie cinétique turbulente seront étudiés en détail. De plus, des simulations en *LES* seront réalisées de manière à observer l'évolution temporelle des phénomènes physiques. L'utilisation du modèle à l'échelle de l'ouvrage a pour but d'étudier les phénomènes physiques à l'échelle globale. La confrontation du modèle numérique avec l'expérience permettra principalement d'observer l'influence de l'utilisation d'une approche milieu poreux pour représenter la grille (écoulement, vitesse, perte de charge,...).

La seconde partie consiste à appliquer une approche lagrangienne au sein des deux modèles. Le suivi de particules dans le modèle local permettra de mettre en évidence les caractéristiques des particules et l'influence des phénomènes physiques provoqués par la grille sur la trajectoire des particules. Le modèle global sera également soumis à l'étude du transport solide via une approche lagrangienne. L'analyse du suivi de particules permettra d'évaluer les processus de sédimentation en fonction des caractéristiques des particules et de déterminer celles susceptibles d'être retenues par la grille.

## I. COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE A L'ECHELLE DE LA GRILLE

L'objectif du modèle local est d'observer les phénomènes physiques mis en jeu à proximité des orifices. L'utilisation de ce modèle permettra par exemple de visualiser les champs de vitesse, de pression ou d'énergie cinétique turbulente pour le débit nominal de fonctionnement (25 l/s). Cependant, avant de discuter des phénomènes observés, il est nécessaire d'étudier la sensibilité des résultats au modèle de turbulence. Une fois validé, le modèle permettra de tester deux autres débits : 15 et 50 l/s. Nous pourrions analyser ainsi l'influence du débit sur le comportement hydrodynamique à proximité de la grille. Les simulations réalisées sont rapportées dans le *Tableau 17*. Ce tableau met également en évidence les conditions aux limites de vitesses à utiliser. La vitesse d'entrée correspond à une mesure expérimentale proche de la grille ( $z = 0,38$  m ;  $\Theta = 180^\circ$  ;  $R = 0,59$  m). La vitesse de sortie permettant le passage de l'écoulement à travers la grille est obtenue en utilisant la méthode décrite précédemment dans la *Partie 3-II-1.2*. Nous avons également jugé utile de renseigner la durée du calcul pour comparer les différents modèles de turbulence. Une analyse de convergence a été réalisée pour s'assurer de la stabilité des résultats. Les temps de calcul donnés dans le *Tableau 17* sont obtenus en utilisant une station de calcul de 48 cœurs (4 serveurs bi-processeurs Intel X-5650 à 2,67 Ghz de 24 GO de RAM).

Après avoir simulé l'écoulement, les modèles seront utilisés pour appliquer la méthode de suivi de particules dans l'objectif d'observer le comportement des particules à proximité de la grille.

	<b>Modèle</b>	<b>Débit (l/s)</b>	<b>Vitesse entrée (m/s)</b>	<b>Vitesse sortie (m/s)</b>	<b>Temps de calcul (h)</b>
1	<i>RANS + k-ε</i>	25	0,717	0,688	2,3
2	<i>RANS + k-ε RNG</i>	25	0,717	0,688	2,3
3	<i>RANS + RSM</i>	25	0,717	0,688	4,2
4	<i>LES</i>	25	0,717	0,688	20
5	<i>RANS + RSM</i>	15	0,361	0,344	4,2
6	<i>RANS + RSM</i>	50	1,749	1,691	4,2

*Tableau 17. Simulations réalisées avec le modèle local*

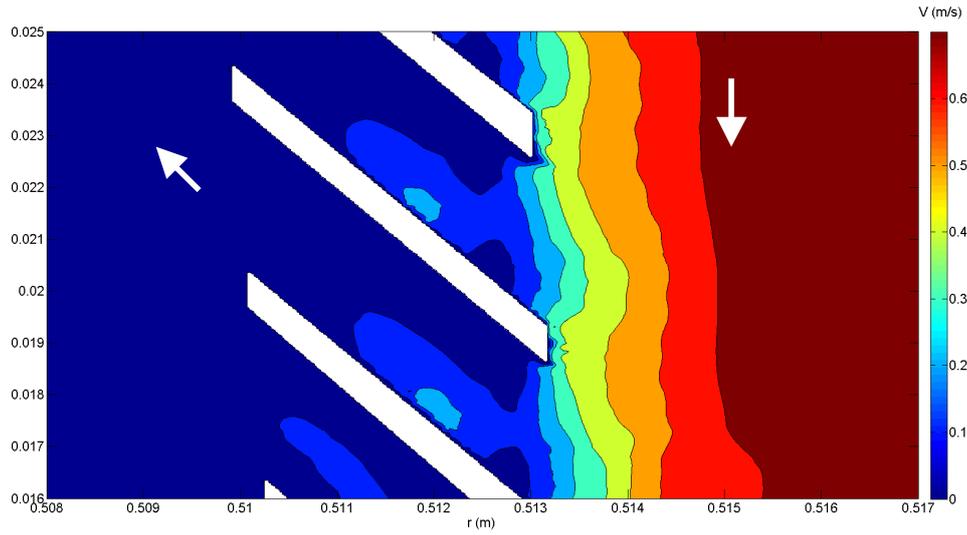
## 1. CONFRONTATION DES MODELES DE TURBULENCE

L'étude de sensibilité au modèle de turbulence est essentielle avant même de confronter les modèles avec l'expérimental. Pour faciliter la comparaison des résultats entre eux, un code de visualisation et de comparaison des résultats a été écrit à l'aide du logiciel *Matlab*<sup>®</sup>.

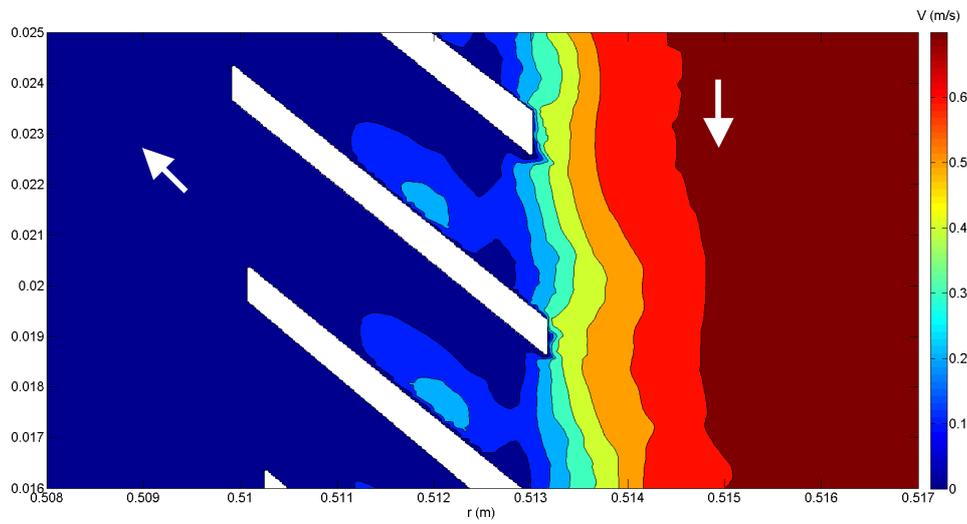
L'observation des champs de vitesse horizontaux (coupe horizontale à mi-hauteur) (*Figure 116* à *Figure 118*) montre, à première vue, très peu de différence de vitesse entre les différents modèles. L'utilisation du code de visualisation nous a permis d'observer les différences en confrontant directement les champs de vitesse obtenus pour chaque modèle. La *Figure 119* représente la différence entre le modèle *RSM* et le modèle *k-ε*. Ainsi, en observant cette figure, on constate que le modèle *RSM* permet d'obtenir des vitesses à proximité de la grille plus importantes (différence de 0,13 m/s) par rapport à un modèle *k-ε*. Par rapport à un modèle *k-ε RNG* (*Figure 120*), cette différence de vitesse est légèrement plus faible avec une vitesse en moyenne plus forte de 0,05 m/s proche de la grille et jusqu'à 0,1 m/s contre les bandelettes de métal. D'autre part, la différence entre un modèle *k-ε RNG* et *k-ε* (*Figure 121*) montre une légère augmentation des vitesses (0,05 m/s) du modèle *k-ε RNG* à proximité des orifices. Nous remarquons également que plus on s'éloigne de la grille, moins il y a de différences. Les différences sont également proches de zéro dans la partie intérieure.

Concernant les pressions, les champs obtenus avec les deux modèles isotropes *k-ε* et *k-ε RNG* (*Figure 122* et *Figure 123*) sont très ressemblants. En revanche, on constate que les dépressions sont plus importantes avec un modèle *RSM* (*Figure 124*). Pour quantifier ces différences, nous pouvons procéder de la même manière que précédemment en cartographiant les différences. L'observation de la *Figure 127* montre qu'il y a très peu de différence entre les deux modèles isotropes. Les différences ne dépassent pas 10 Pa. En revanche, l'utilisation d'un modèle *RSM* augmente considérablement les phénomènes de pression. Les *Figure 125* et *Figure 126* montrent une différence d'environ 40 Pa au niveau des bandelettes mais aussi dans l'entrefer.

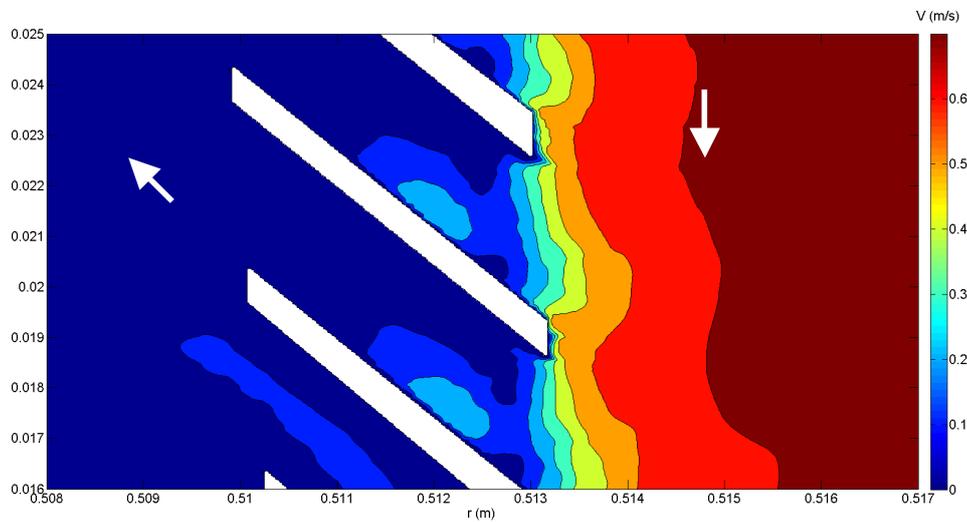
La dernière variable que l'on va comparer est l'énergie cinétique turbulente. L'étude de cette variable est très importante dans le sens où elle montre la bonne reproduction des fluctuations de vitesse. A première vue, on constate que les phénomènes de turbulence sont différents suivant les modèles utilisés (*Figure 128* à *Figure 130*). On remarque sur ces figures qu'il y a peu de fluctuations dans la partie intérieure. L'énergie cinétique turbulente est proche de zéro dans cette zone. En revanche, l'extrémité des bandelettes présente des forts taux d'énergie cinétique turbulente. Ces taux sont néanmoins différents en fonction du modèle de turbulence adopté : 0,05 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> pour le modèle *k-ε* et 0,035 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> pour le modèle *RSM*.



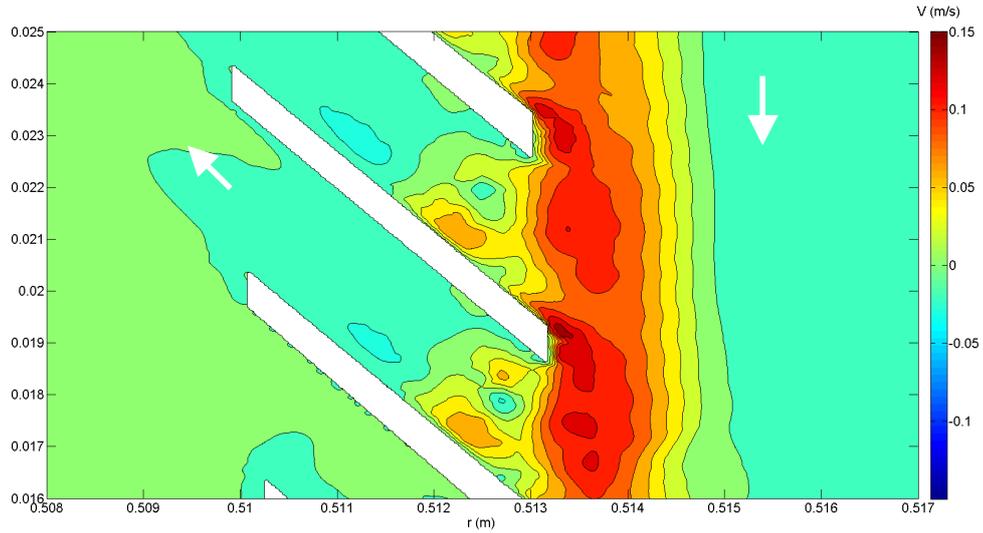
*Figure 116. Champ de vitesse pour un modèle isotrope  $k-\varepsilon$  pour un débit nominal*



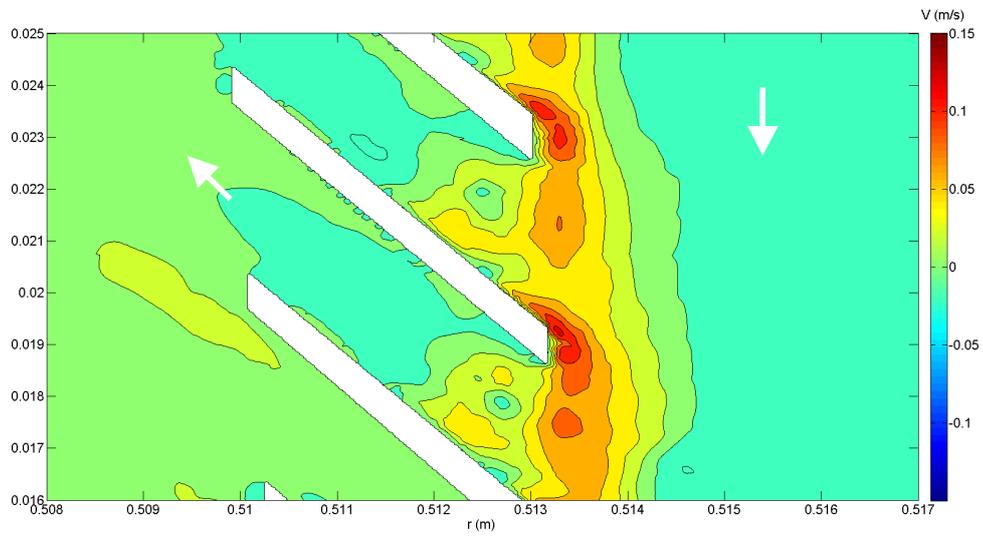
*Figure 117. Champ de vitesse pour un modèle isotrope  $k-\varepsilon$  RNG pour un débit nominal*



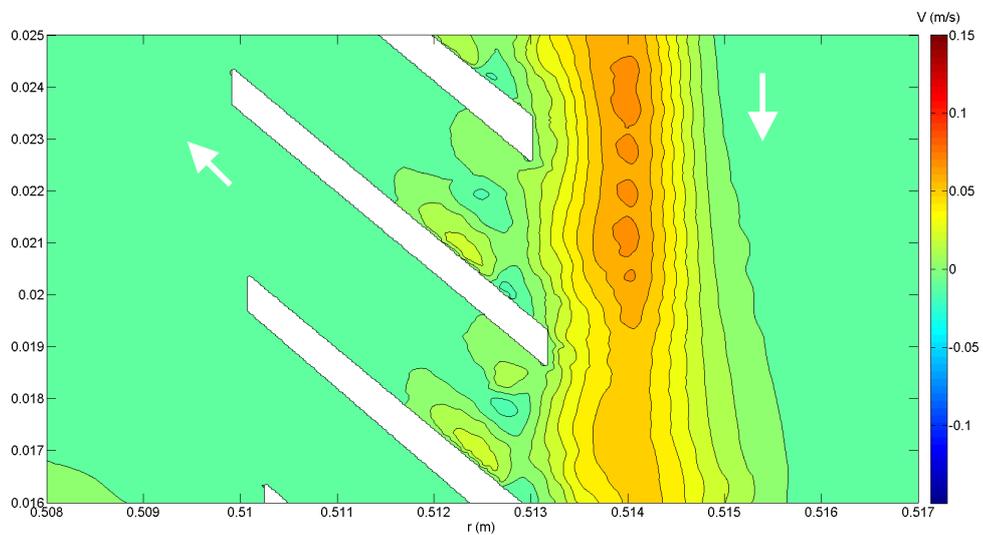
*Figure 118. Champ de vitesse pour un modèle anisotrope RSM pour un débit nominal*



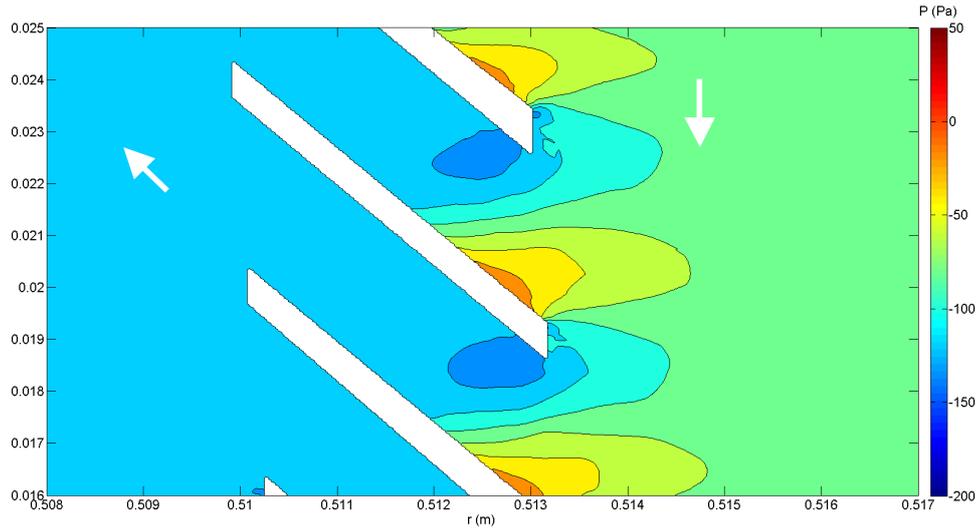
**Figure 119. Différence de vitesse (RSM -  $k-\epsilon$ ) pour un débit nominal**



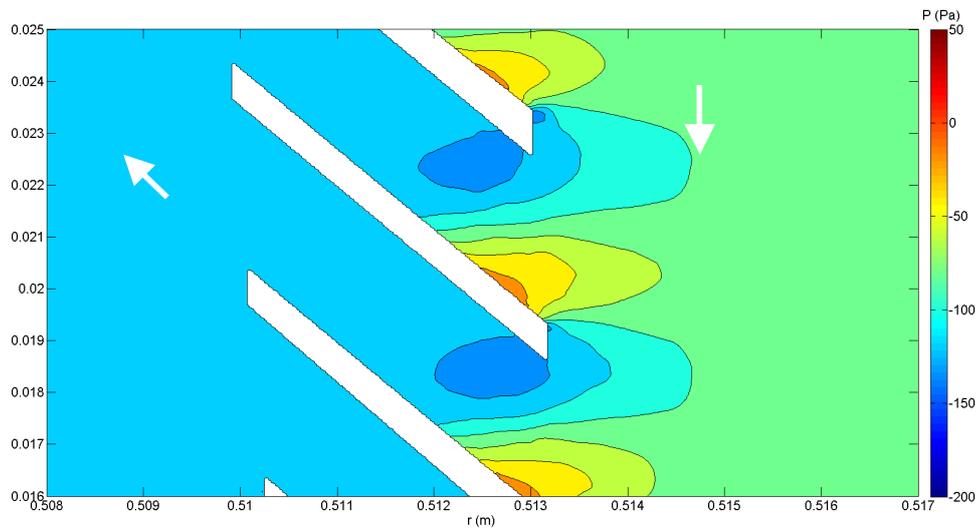
**Figure 120. Différence de vitesse (RSM -  $k-\epsilon$  RNG) pour un débit nominal**



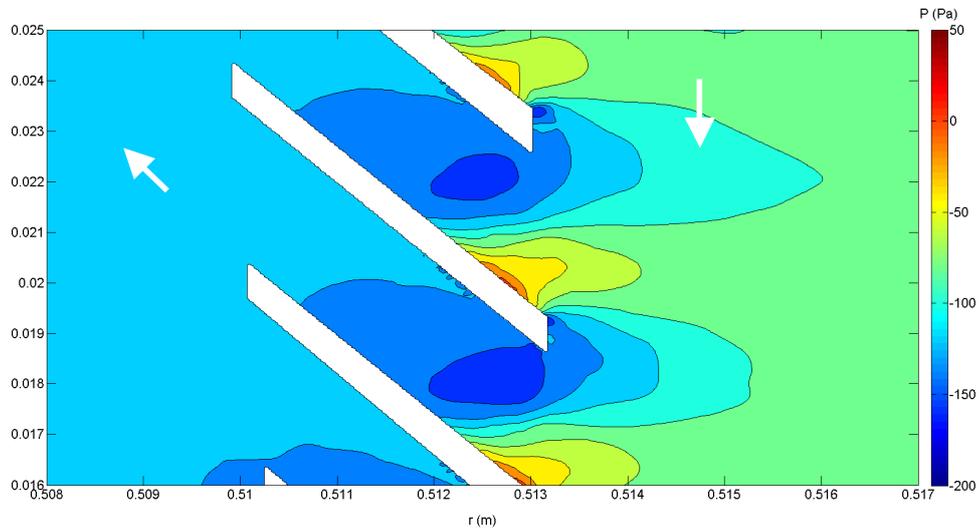
**Figure 121. Différence de vitesse ( $k-\epsilon$  RNG -  $k-\epsilon$ ) pour un débit nominal**



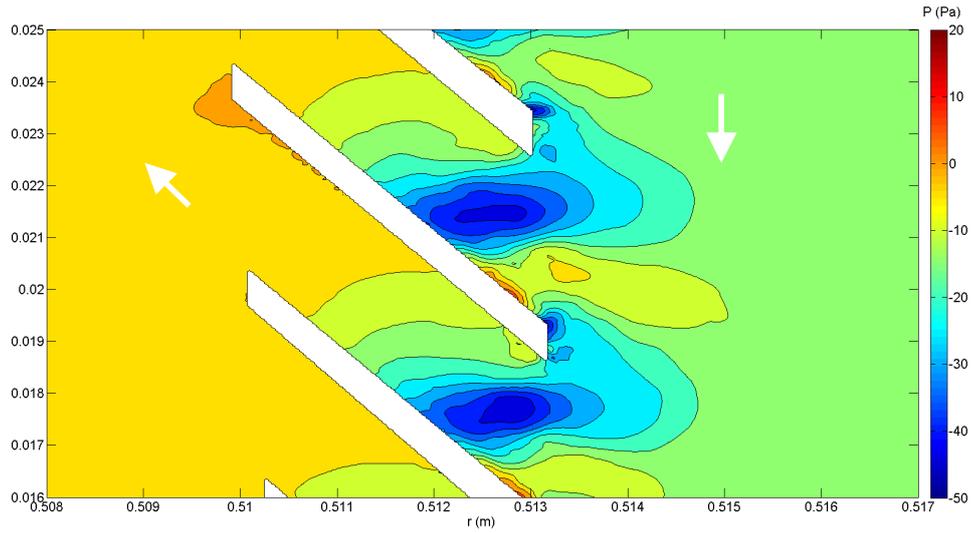
*Figure 122. Champ de pression pour un modèle isotrope  $k-\epsilon$  pour un débit nominal*



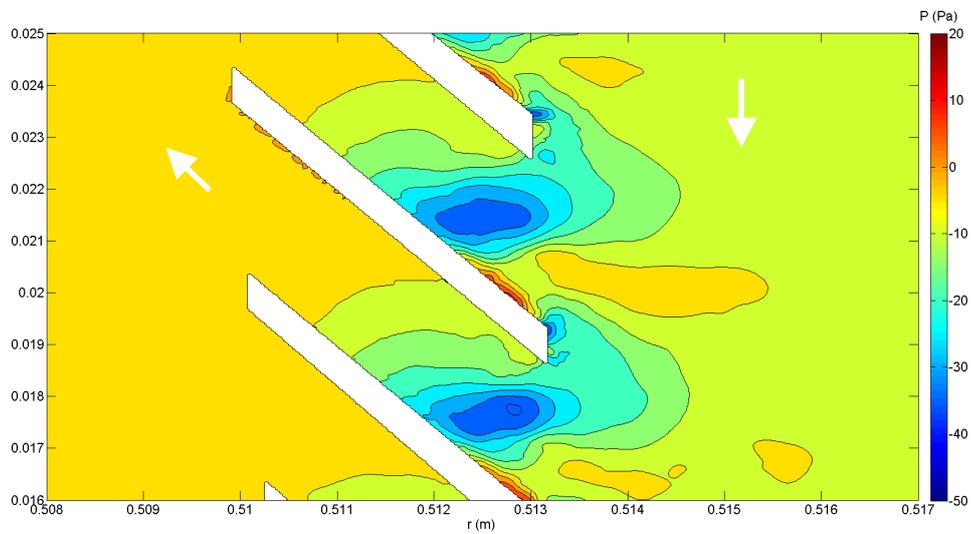
*Figure 123. Champ de pression pour un modèle isotrope  $k-\epsilon$  RNG pour un débit nominal*



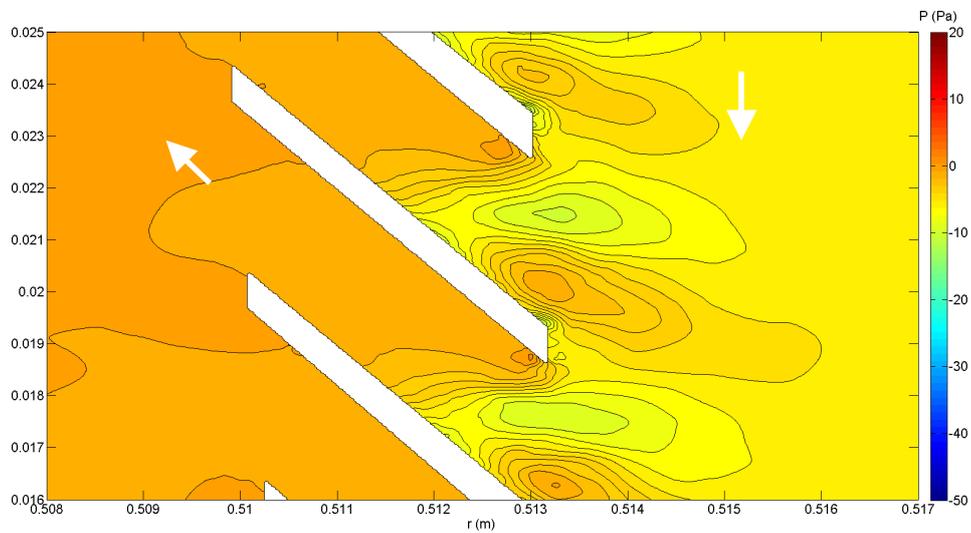
*Figure 124. Champ de pression pour un modèle anisotrope RSM pour un débit nominal*



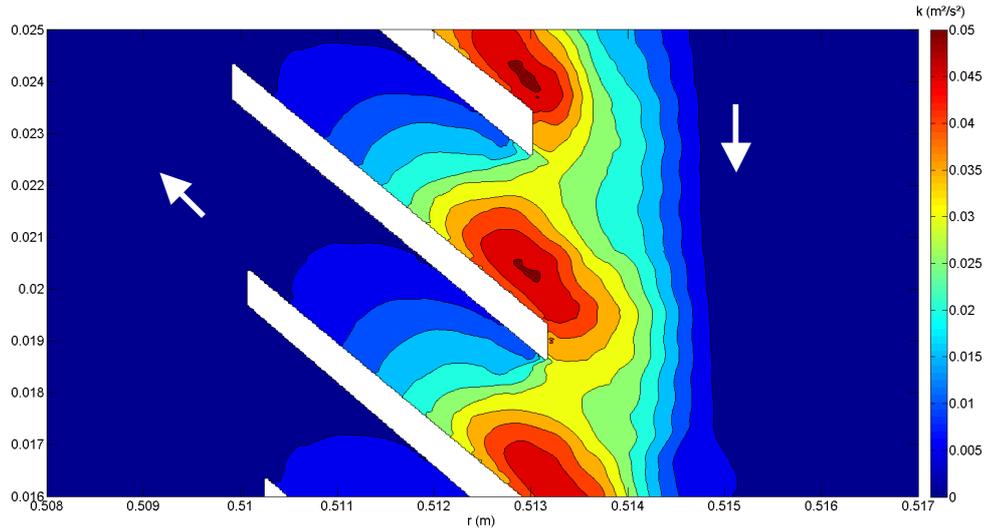
**Figure 125. Différence de pression (RSM -  $k-\epsilon$ ) pour un débit nominal**



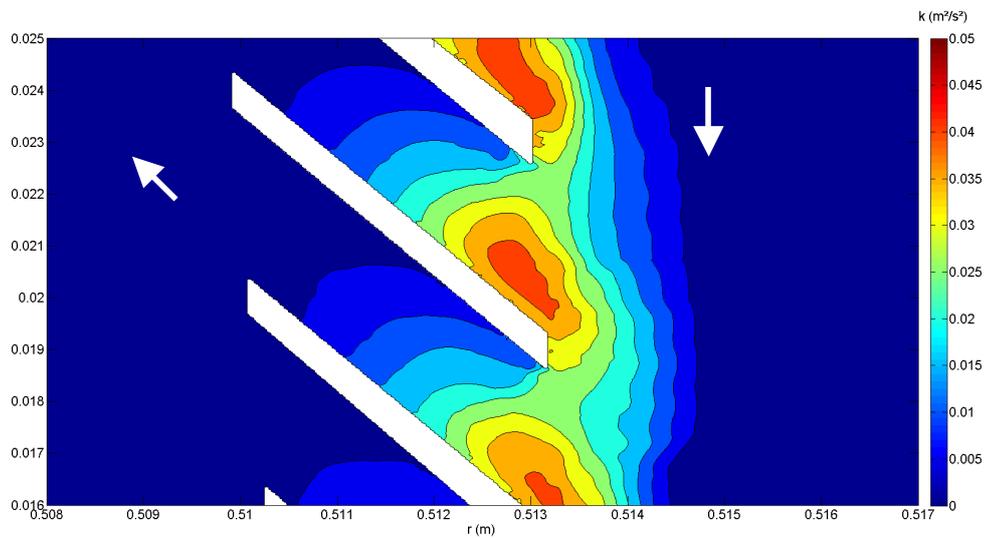
**Figure 126. Différence de pression (RSM -  $k-\epsilon$  RNG) pour un débit nominal**



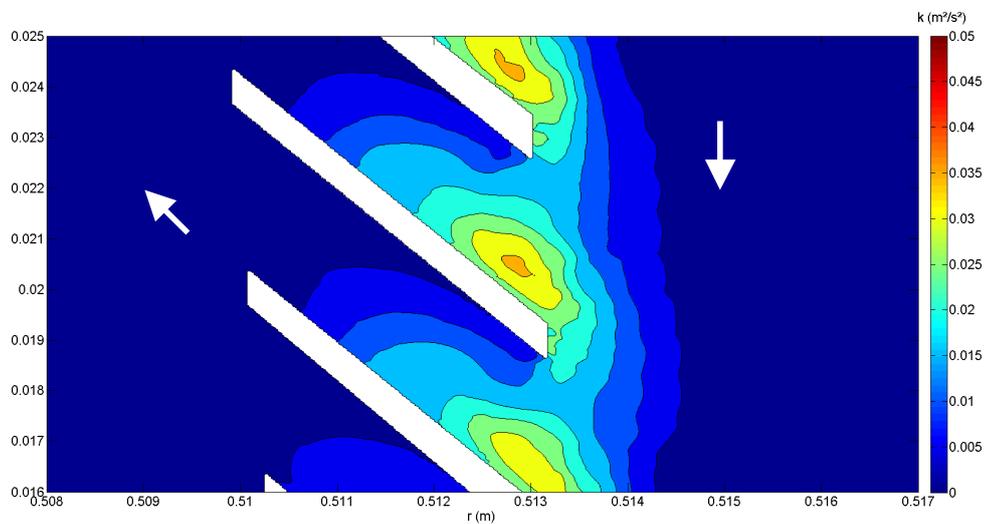
**Figure 127. Différence de pression ( $k-\epsilon$  RNG -  $k-\epsilon$ ) pour un débit nominal**



*Figure 128. Champ d'énergie cinétique turbulente pour un modèle isotrope  $k-\epsilon$  pour un débit nominal*



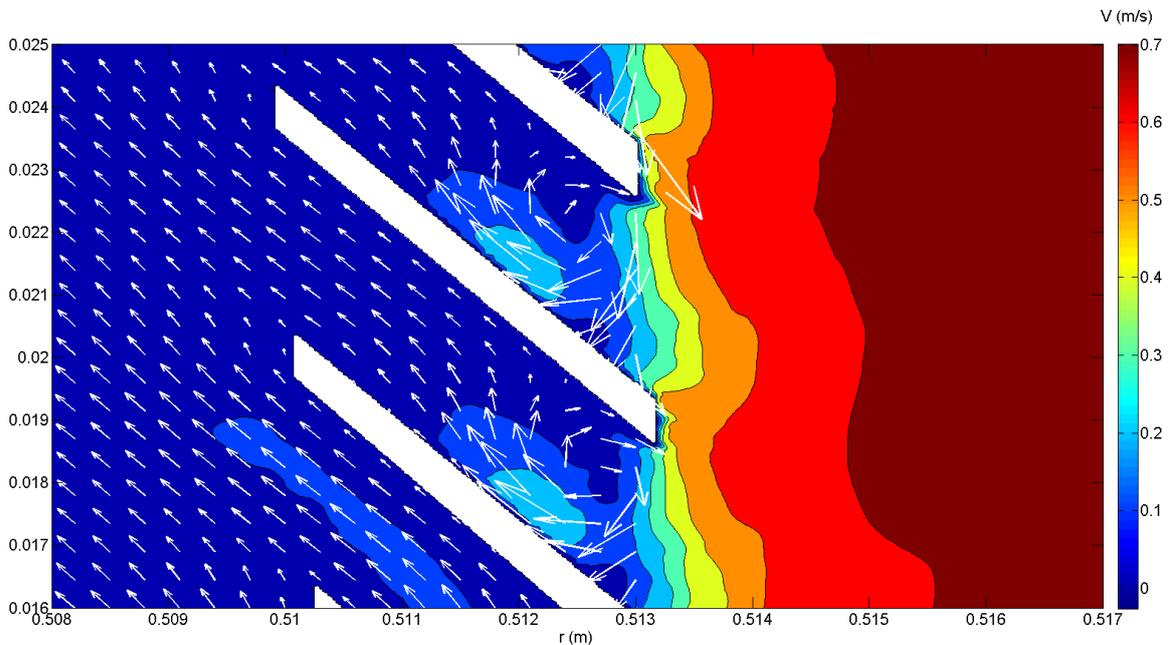
*Figure 129. Champ d'énergie cinétique turbulente pour un modèle isotrope  $k-\epsilon$  RNG pour un débit nominal*



*Figure 130. Champ d'énergie cinétique turbulente pour un modèle anisotrope RSM pour un débit nominal*

## Bilan

Les résultats précédents montrent de nombreuses différences concernant les grandeurs observées. Il faut donc faire un choix de modèle de turbulence pour la suite de l'étude. D'après l'étude bibliographique, le modèle *RSM* permet de reproduire les phénomènes anisotropes. De plus, il est adapté pour reproduire les recirculations. De tels phénomènes sont observables dans notre cas. On constate une grande recirculation à l'entrée des orifices (*Figure 131*). Ces recirculations peuvent également expliquer les phénomènes de basses pressions dans cette zone. Ainsi, face aux nombreuses différences observées entre les différents modèles, l'utilisation d'un modèle permettant de prendre en compte l'anisotropie de la turbulence comme le *RSM* semble être plus adapté à notre problème. En effet, l'étude des phénomènes turbulents à proximité des orifices est importante dans notre étude. Il est donc primordial d'utiliser un modèle permettant de reproduire la turbulence avec précision.

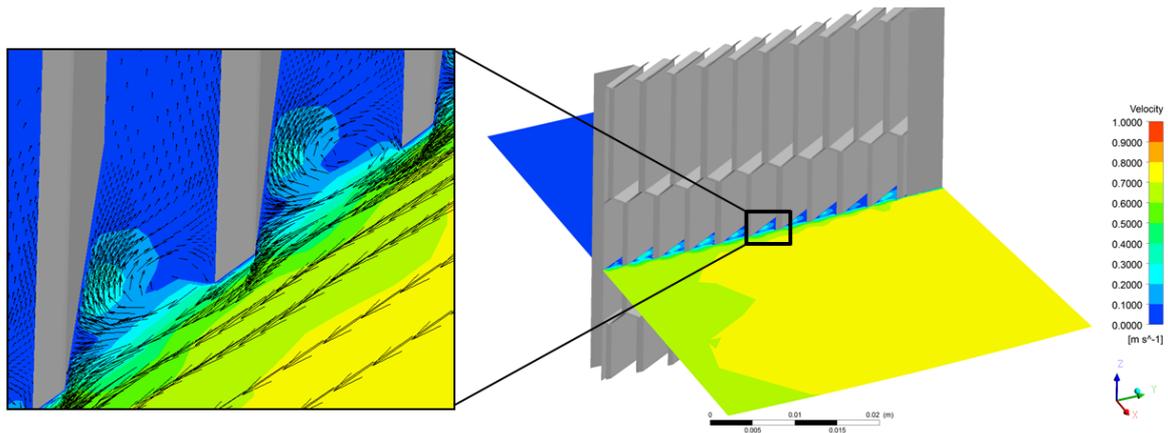


*Figure 131. Champ de vitesse et représentation des vecteurs vitesses obtenus avec un modèle anisotrope RSM pour un débit nominal*

## 2. COMPARAISON ENTRE LE MODELE *RSM* ET LES DONNEES EXPERIMENTALES

### 2.1 Champs de vitesse

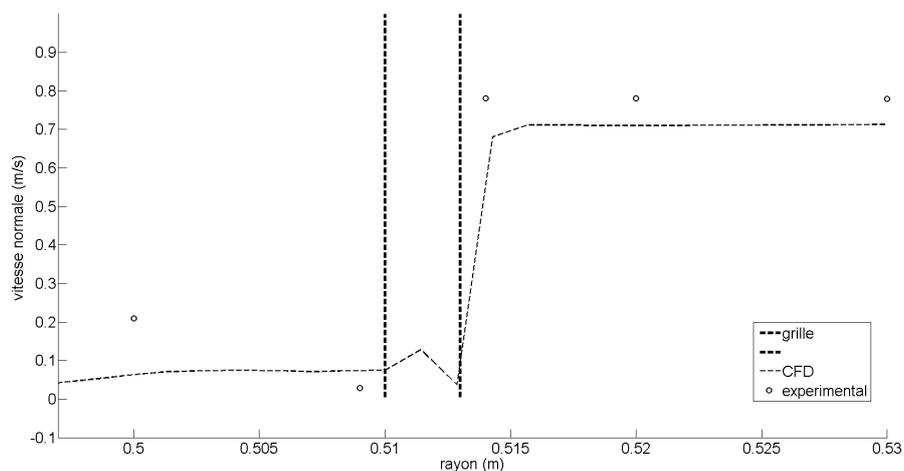
La visualisation de l'écoulement par la simulation numérique permet de mettre en avant de nombreux phénomènes. Parmi ces phénomènes, on observe entre les orifices de la grille la présence de recirculations (*Figure 132*). Ces recirculations sont également visibles dans la réalité puisque l'étude du transport solide a permis de montrer que certaines particules de faibles masses volumiques étaient entraînées dans ces zones tourbillonnantes.



**Figure 132. Vecteurs vitesses au niveau des orifices pour un débit nominal**

L'expérience nous a également montré que la forme de la grille était responsable du sens de l'écoulement dans la partie centrale. L'orientation des bandelettes de métal oblige le fluide à effectuer un mouvement inverse par rapport au courant tangentiel à l'amont de la grille. Ce mouvement implique un écoulement dans le sens contraire dans la partie centrale de l'ouvrage. Ce phénomène est également reproduit par le modèle local.

L'exportation des vitesses normales sur une ligne traversant un orifice, et perpendiculaire à la grille, permet de comparer les résultats avec les mesures expérimentales de part et d'autre de la grille. Les résultats de comparaison, visibles sur la *Figure 133*, montrent que les valeurs sont légèrement plus grandes à proximité des orifices via l'expérimentation (environ 12 %). Ces différences s'expliquent par la valeur de la vitesse injectée sur la surface d'entrée du modèle local. En effet, nous avons choisi d'injecter la valeur de la vitesse (0,717 m/s) mesurée à la position  $\Theta = 180^\circ$  ;  $z = 0,38$  m ;  $R = 0,59$  m, alors que les mesures effectuées avec l'ADV *side looking* ont montré des vitesses à proximité de la grille d'environ 0,8 m/s.



**Figure 133. Comparaison des vitesses normales à l'amont et à l'aval de la grille**

## 2.2 Pertes de charge de la grille

Si les variables locales sont difficiles à comparer entre le numérique et l'expérimental (utilisation d'une portion de la grille, incertitude liée aux instruments de mesure,...), l'utilisation du bilan de puissance permettant de calculer les pertes énergétiques de la grille (équation (15) dans la *Partie 3*) est très intéressante pour valider le modèle local. Contrairement à la comparaison directe des variables locales de l'écoulement, l'analyse des pertes de charges permet de comparer de manière plus globale les deux approches. En ajoutant aux résultats de simulation à 25 l/s les deux autres débits (simulations 5 et 6 du *Tableau 17*), nous pouvons tracer l'évolution de la perte de charge en fonction du carré de la vitesse moyenne traversant la grille. Le graphique de la *Figure 134* montre l'évolution de ces pertes de charges correspondant à des débits de 15, 25 et 50 l/s et obtenues via l'expérimentation ainsi qu'avec le modèle numérique local.

Les pertes de charges obtenues numériquement sont très proches de celles mesurées sur le pilote. Par exemple, pour un débit équivalent à 25 l/s, on obtient une perte de charge de 0,054 m avec le modèle numérique et 0,055 m avec les mesures expérimentales, soit une erreur relative inférieure à 2 %. En revanche, pour les faibles débits ainsi que les forts débits, les erreurs sont plus importantes (respectivement 40 % et 11 % pour 15 l/s et 50 l/s). Ces différences s'expliquent par la difficulté à mesurer les pertes de charges pour ces débits (voir *Partie 2*). En effet, à 15 l/s, il y a très peu de différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval de la grille. Pour 50 l/s, il y a beaucoup de battements.

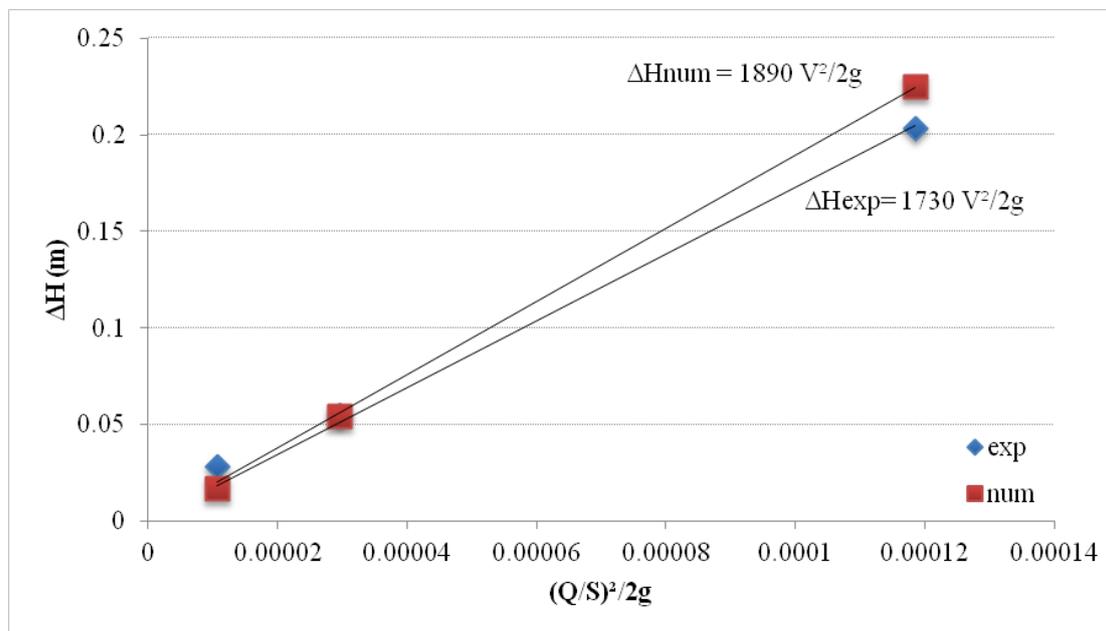


Figure 134. Comparaison des pertes de charge entre le modèle numérique local et l'expérimental

La détermination du coefficient de perte de charge  $K$  de la grille, permettant notamment de caler le milieu poreux, est possible via les deux approches. En comparant les deux coefficients,  $K_{num}$  et  $K_{exp}$ , obtenus respectivement par l'approche numérique et l'étude expérimentale, on obtient une erreur relative inférieure à 10 %.

Pour résumer, l'utilisation d'un modèle *RSM* permet de reproduire l'écoulement à proximité de la grille. D'autre part, la détermination du coefficient de perte de charge à l'aide du modèle numérique permet d'obtenir des résultats avec une erreur de 10 % pour un débit de 25 l/s par rapport à l'expérimentation.

### 3. DESCRIPTION DES PHENOMENES PHYSIQUES A PROXIMITE DE LA GRILLE

Une fois validée, l'approche numérique est très intéressante. Dans notre cas, elle va nous permettre de mettre en avant les phénomènes physiques mis en jeu à proximité des orifices, difficilement visibles et difficilement mesurables via l'expérimentation. La discussion sur le champ de vitesse étant déjà réalisée plus haut, nous nous intéressons principalement aux champs de pression ainsi qu'aux phénomènes de turbulence.

#### 3.1 Champ de pression

Dans la *Figure 135*, les points de pression ne sont pas des valeurs représentatives de la réalité. Si le comportement est bien hydrostatique dans le modèle, l'utilisation d'une condition de type "outflow" pour évacuer le débit à l'aval de la grille fait apparaître des pressions négatives. L'utilisation d'une condition de pression atmosphérique ( $P = 0$  Pa) permet d'obtenir des valeurs plus grandes, mais cette condition fait apparaître de forts gradients de vitesse et de pression au niveau des sorties qui sont problématiques pour le calcul des puissances. La condition "outflow" a donc été conservée et l'analyse s'est portée sur les différences de pression.

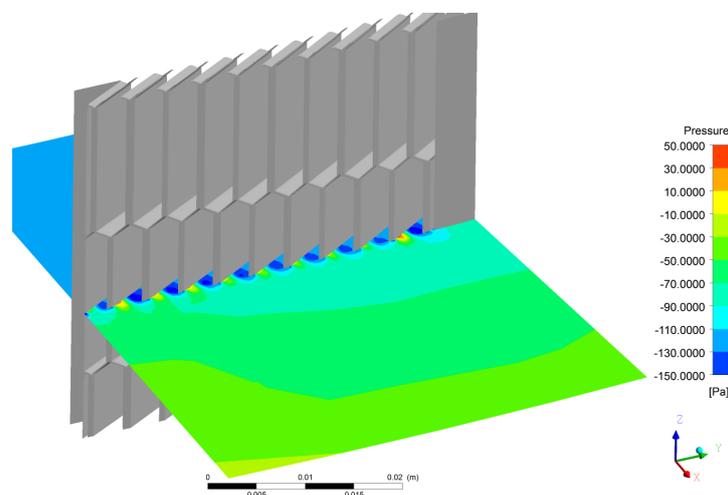
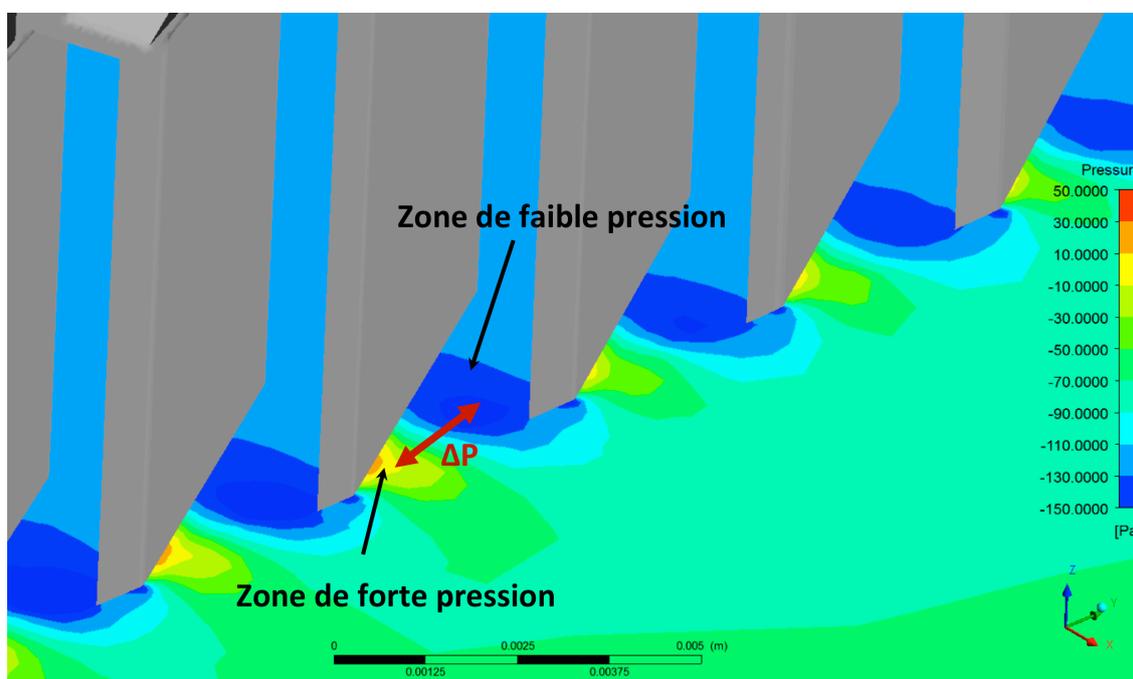


Figure 135. Champ de pression pour un débit nominal

On visualise à l'extrémité des bandelettes de métal des zones de forte pression (*Figure 136*). De plus, la zone où l'on observe les recirculations est caractérisée par de très faibles pressions. La différence de pression  $\Delta P$  (égale à 150 Pa) entre ces deux zones est un résultat intéressant car ces forces de pression peuvent modifier la trajectoire des polluants. Face à l'objectif de limiter le colmatage, ces forces de pression sont intéressantes car le point de pression le plus important étant situé sur les bandelettes, il permettra de repousser les polluants vers des zones de pression plus faible.



*Figure 136. Champ de pression proche de la grille pour un débit nominal*

### 3.2 Energie cinétique turbulente

L'énergie cinétique turbulente joue également un rôle important sur la trajectoire des particules. En rappelant par exemple les travaux de Dufresne (2008) où l'auteur a montré l'influence que pouvait avoir l'énergie cinétique turbulente sur la dispersion des particules, on peut utiliser cette grandeur pour observer des zones susceptibles de disperser les particules.

La *Figure 137* met en évidence un fort taux d'énergie cinétique turbulente à proximité de la grille, avec des zones ayant des valeurs très importantes ( $0,035 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) à l'extrémité des bandelettes. Deux hypothèses peuvent donc être faites à partir de ces résultats. La première consiste à supposer que cette zone où les phénomènes turbulents sont importants permettra de disperser les particules. La deuxième hypothèse que l'on peut formuler concerne la forme de la grille. En effet, il est probable que la forme particulière des orifices soit responsable de ces phénomènes de turbulence. L'utilisation d'un modèle local utilisant une autre forme de grille permettra de valider cette hypothèse.

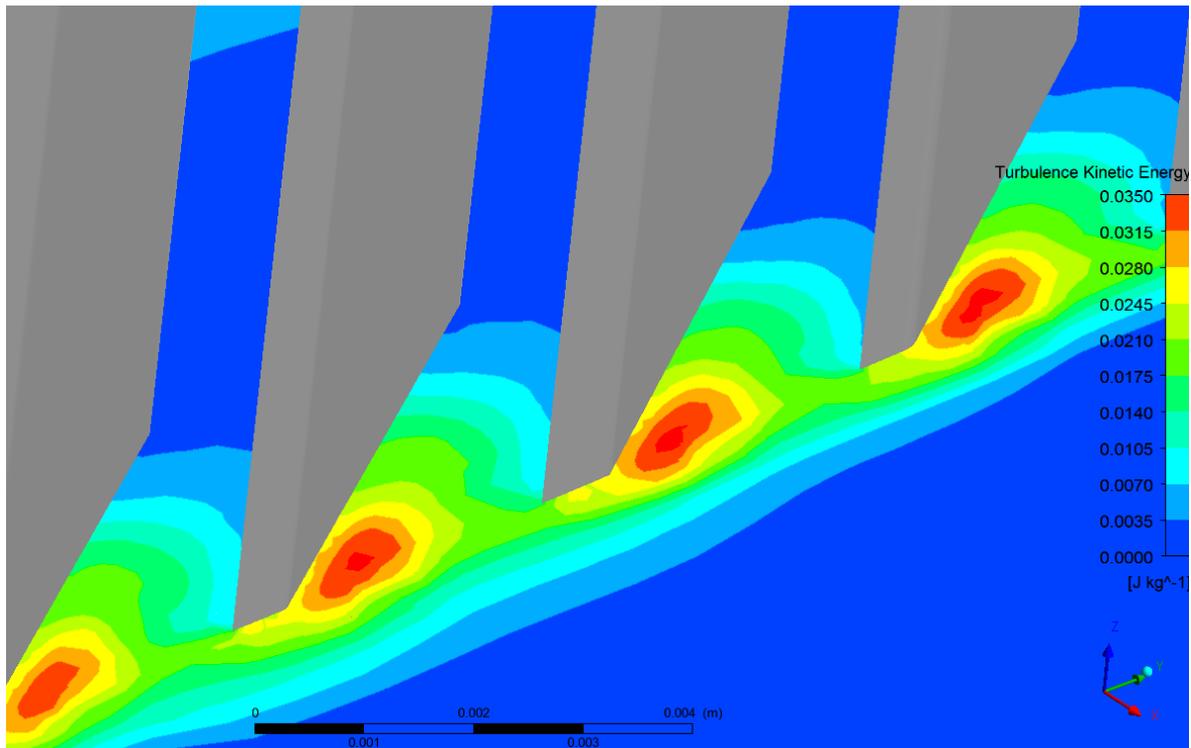


Figure 137. Champ d'énergie cinétique turbulente proche de la grille pour un débit nominal

## Bilan

Les résultats des simulations obtenus avec un modèle *RSM* ont permis de montrer la présence de nombreux phénomènes physiques à proximité des orifices. Tout d'abord, l'orientation du métal permet de réorienter l'écoulement dans la partie centrale de l'ouvrage. De plus, nous avons pu observer la présence de recirculations au niveau de l'entrefer. Enfin, des phénomènes physiques susceptibles de favoriser l'éjection des particules ont été simulés : des gradients de pression importants ainsi que des taux d'énergie cinétique turbulente élevés ont été observés à l'extrémité des bandelettes de métal.

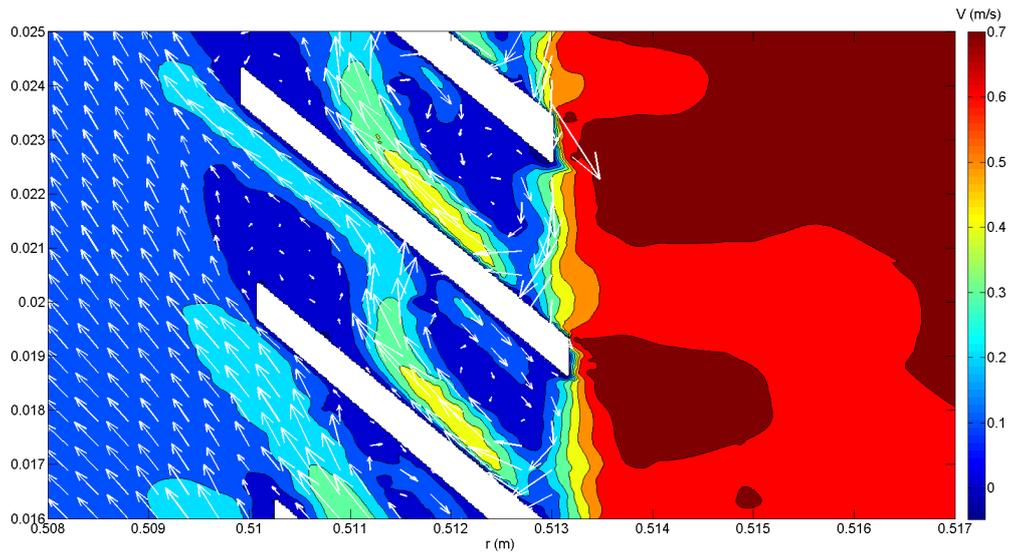
## 4. ETUDE EN REGIME INSTATIONNAIRE

Consommatrice en temps de calcul (cinq fois plus long que le calcul en *RSM*), l'étude en régime instationnaire par une approche *LES* a plusieurs avantages. Le principal avantage est que cette technique permet d'observer directement les fluctuations de vitesse et de pression au cours du temps. D'autre part, la *LES* ne nécessite aucun modèle de turbulence. De ce fait, cette approche permet de modéliser par exemple un écoulement laminaire dans l'entrefer, là où nous avons intégré un modèle de turbulence avec l'approche *RANS*, en faisant l'hypothèse que l'écoulement soit turbulent dans cette zone. Dans ce contexte, la comparaison entre les deux méthodes numériques est intéressante.

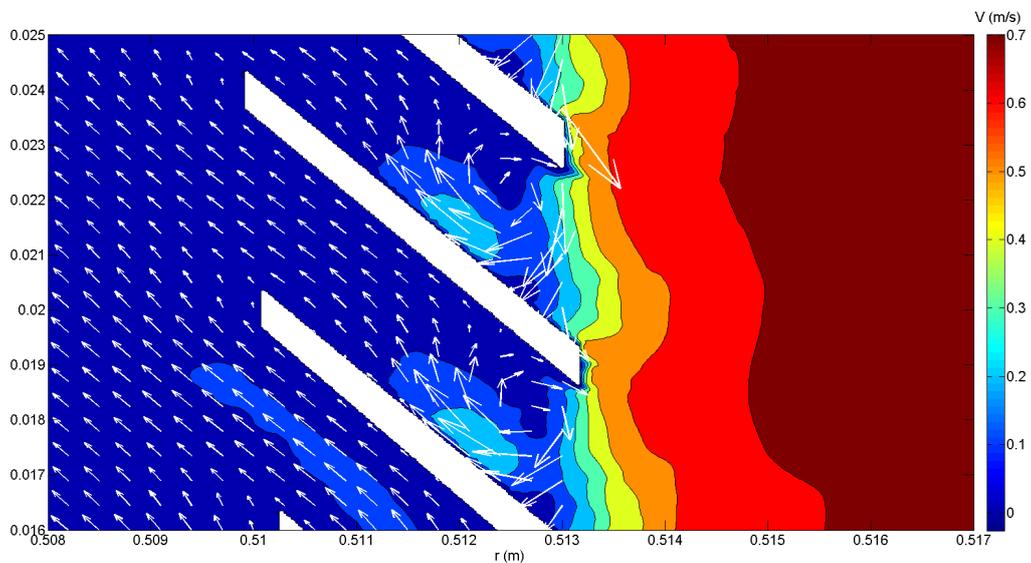
#### 4.1 Comparaison entre LES et RANS-RSM

Pour mettre en évidence l'influence du modèle de turbulence, nous avons comparé ces deux approches. La *Figure 138* et *Figure 139* montrent les champs de vitesse ainsi que les vecteurs vitesses à l'entrée de la grille obtenus respectivement avec la *LES* (avec un *SGS* *Wale*) et avec un modèle de turbulence *RSM*.

A l'extérieur de la grille, le gradient de vitesse n'est pas tout à fait identique entre les deux méthodes. L'approche *LES* montre des zones de vitesses importantes proche des orifices (0,7 m/s), alors que ces zones sont moins marquées avec une approche *RANS* (0,55 m/s).

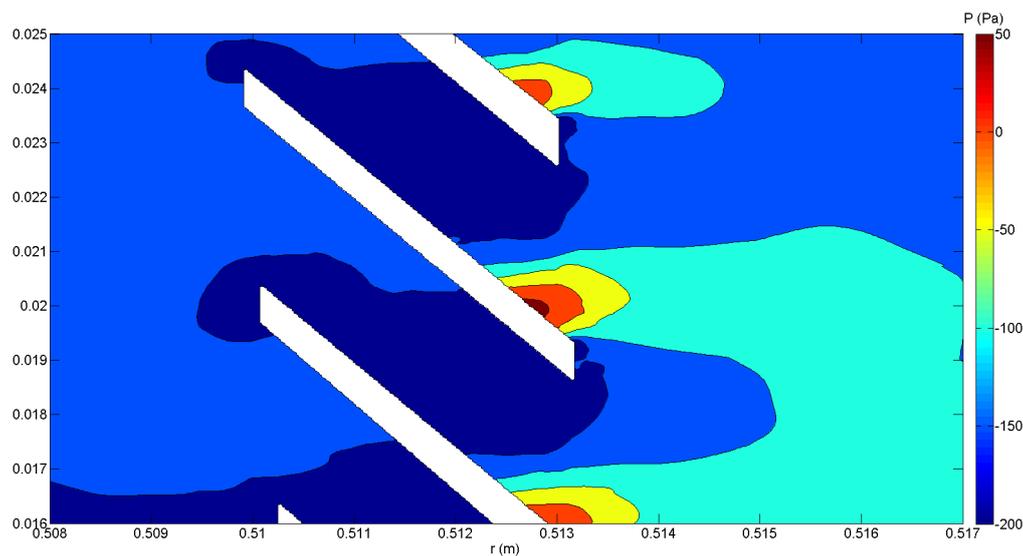


*Figure 138. Champ de vitesse instantané et vecteurs vitesses proche de la grille pour un débit nominal en utilisant une approche LES*

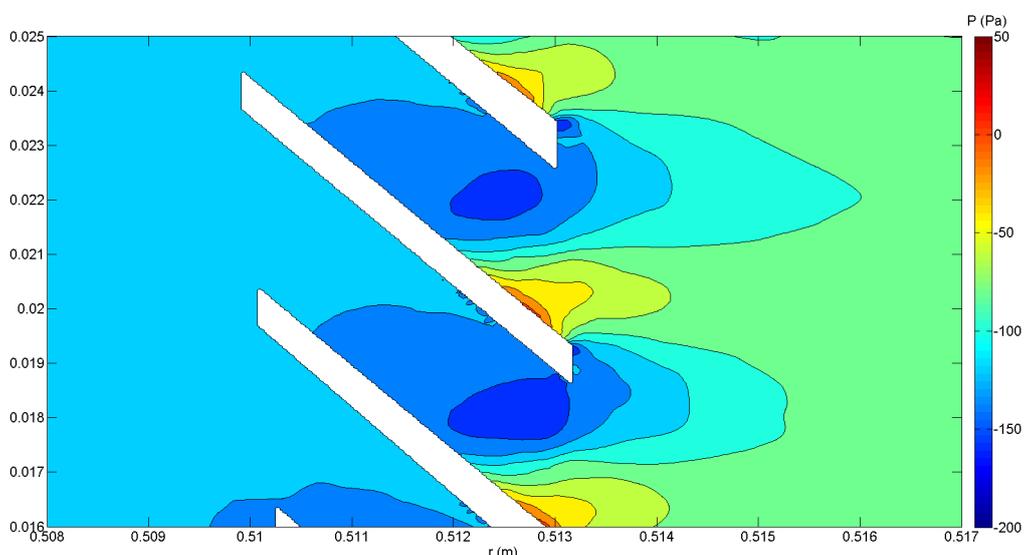


*Figure 139. Champ de vitesse moyen et vecteurs vitesses proche de la grille pour un débit nominal en utilisant une approche RANS et un modèle RSM*

La principale différence entre les deux méthodes se trouve dans l'entrefer. Avec un modèle de turbulence *RSM* (Figure 139), on observe une recirculation à l'entrée de l'orifice ainsi qu'une zone de forte vitesse (environ 0,25 m/s) sur le bord de l'orifice. Avec une approche *LES* (Figure 138), cette recirculation est deux fois plus longue et la zone de forte vitesse beaucoup plus marquée (environ 0,4 m/s). De plus, l'écoulement à travers l'orifice se déplace vers la bandelette opposée en raison de la présence d'une seconde recirculation à l'arrière de l'orifice. Cette recirculation, d'une taille équivalente à la première, provoque une contraction de la veine fluide qui passe par l'orifice, ce qui explique également les valeurs plus importantes du champ de vitesse dans l'orifice.



**Figure 140.** Champ de vitesse instantané et vecteurs vitesses proche de la grille pour un débit nominal en utilisant une approche *LES*

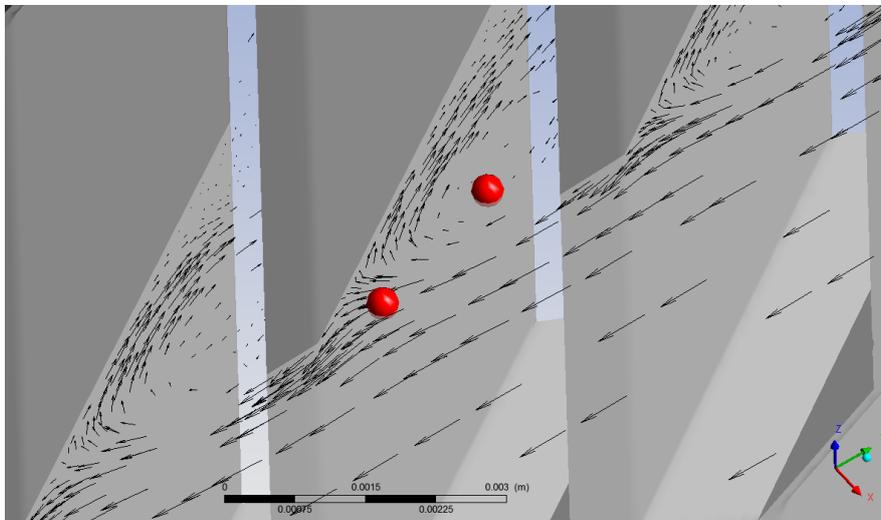


**Figure 141.** Champ de vitesse moyen et vecteurs vitesses proche de la grille pour un débit nominal en utilisant une approche *RANS* et un modèle *RSM*

En comparant les champs de pression entre les deux approches, on remarque que les profils sont ressemblants. On identifie clairement les zones de fortes pressions à l'extrémité des bandelettes ainsi que les zones de faibles pressions dans l'entrefer. Pour la *LES*, les zones de faibles pressions sont plus importantes (environ 20 Pa) qu'avec un modèle *RSM*. De plus, la zone de faible pression s'étend sur la longueur de l'orifice. Ce constat montre donc le lien entre les phénomènes de recirculation et les zones de faibles pressions. Concernant les fortes pressions, l'approche *LES* nous donne des pressions d'environ 20 Pa plus importantes que le modèle *RSM* dans la zone à l'extrémité des bandelettes.

## 4.2 Fluctuations des vitesses au cours du temps

L'approche *LES* permet de visualiser les phénomènes physiques au cours du temps. Nous avons donc choisi d'observer les fluctuations locales des vitesses et des pressions dans les zones susceptibles de nous intéresser : les zones de fortes et faibles pressions à l'extrémité de la grille (points rouges sur la *Figure 142*).



*Figure 142. Points de mesures des fluctuations de vitesse et de pression*

La *Figure 143* permet de mettre en évidence les fluctuations de vitesses tangentielles et radiales autour de leurs valeurs moyennes sur une seconde, et dans les deux zones étudiées. On remarque que dans les deux zones, les fluctuations des vitesses au cours du temps sont faibles. Les amplitudes sont d'environ 0,02 m/s pour les vitesses tangentielles et 0,08 m/s pour les vitesses radiales.

Traduites en énergie cinétique turbulente, ces fluctuations donnent des valeurs très faibles ( $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) et surtout très éloignées des résultats obtenus avec le modèle *RSM* ( $0,035 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) ou encore avec les mesures expérimentales ( $0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ). Même si le calcul est critiquable du fait qu'on effectue le calcul sur une seconde, l'idée ici était d'obtenir un ordre de grandeur sur les phénomènes turbulents. Ainsi, on peut faire l'hypothèse que la géométrie de la grille seule ne permet pas de reproduire

l'ensemble des phénomènes turbulents. Par conséquent, il est nécessaire d'introduire de la turbulence dès l'entrée du modèle. Ceci peut être effectué via les techniques décrites dans l'Annexe C qui consistent à ajouter des perturbations en entrée.

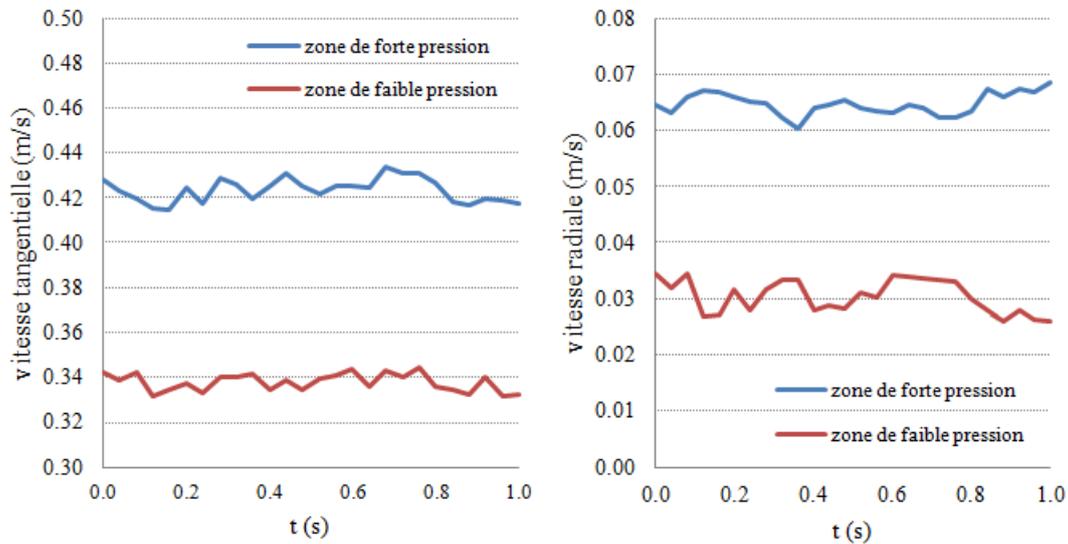


Figure 143. Vitesse tangentielle (à gauche) et radiale (à droite) pour les deux zones pendant 1s

## Bilan

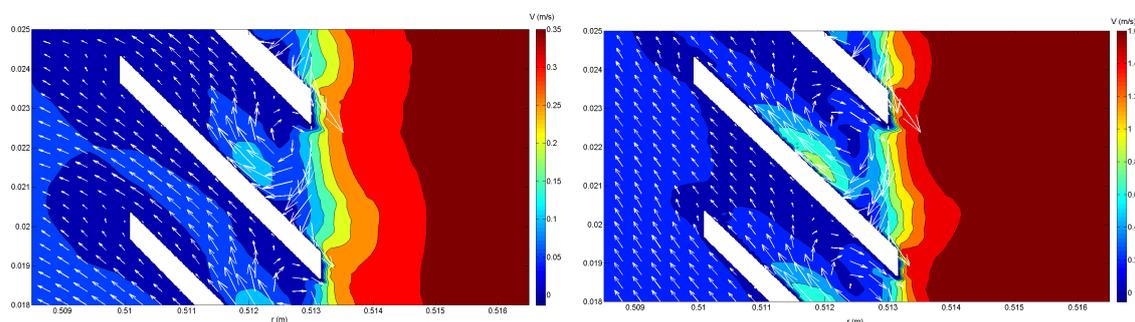
Pour résumer, l'approche *LES* a permis de mettre en évidence certains phénomènes que le modèle de turbulence *RSM* est incapable de reproduire. En effet, nous avons remarqué que l'écoulement dans l'orifice est différent entre les deux approches notamment en sortie de grille, où l'approche *LES* met en avant la présence d'une seconde recirculation. Cependant, le modèle utilisé laisse supposer que pour reproduire correctement la turbulence, il faut injecter des fluctuations dès l'entrée. D'autre part, la comparaison entre les deux méthodes a montré très peu de différences sur les phénomènes à l'amont de la grille. Ces phénomènes étant privilégiés dans notre étude, étant donné que la séparation et le fait que l'efficacité se joue sur la surface amont de la grille, une approche *RANS* avec un modèle de turbulence *RSM* est satisfaisante.

## 5. ETUDE DE L'INFLUENCE DU DEBIT

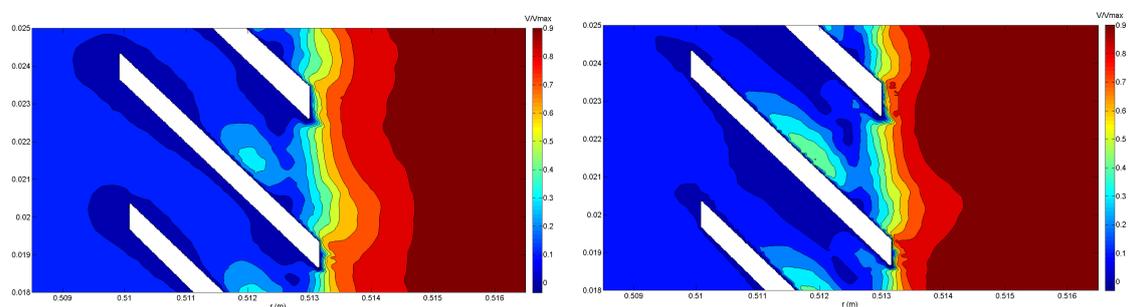
L'objectif de cette partie est de visualiser le comportement hydrodynamique en fonction du débit et d'observer si les phénomènes décrits précédemment sont également présents pour des conditions hydrauliques différentes. Pour ce faire, nous analyserons les résultats des simulations 5 et 6 du Tableau 17.

Au niveau de l'écoulement, on observe le comportement déjà mis en évidence pour 25 l/s, avec la présence de recirculations dans l'entrefer (*Figure 144*). Un moyen de vérifier la présence des phénomènes physiques pour tous les débits est de représenter le champ de vitesse sous forme adimensionnelle, en divisant la valeur de la vitesse par la vitesse maximale dans le domaine ( $V/V_{\max}$ ). La *Figure 145* permet ainsi de distinguer des vitesses plus intenses à l'entrée dans la grille lorsque le débit est plus important.

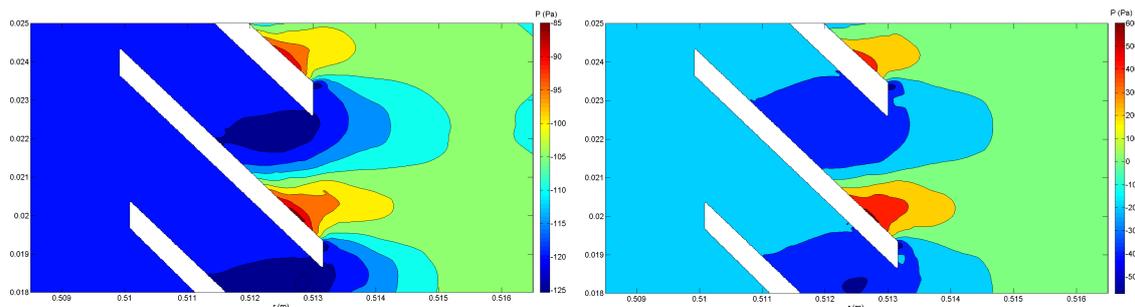
L'allure des champs de pression est également ressemblante pour d'autres débits (*Figure 146*). On distingue très clairement les gradients de pression près des orifices. Quantitativement, on remarque que les différences de pression augmentent avec le débit. Pour 25 l/s, la différence de pression entre les deux zones était de 150 Pa. Pour 15 l/s, on observe une petite différence de pression (30 Pa). Par contre, pour 50 l/s, la différence entre les deux zones est d'environ 700 Pa.



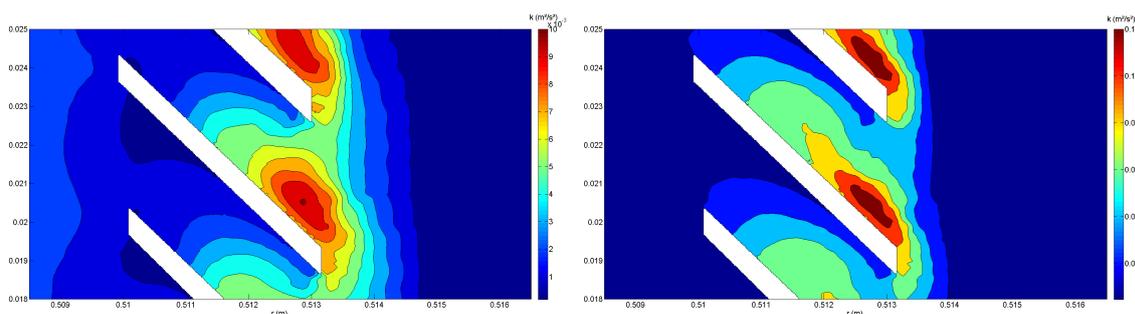
*Figure 144. Champ de vitesse moyen et vecteurs vitesses proche de la grille pour un débit de 15l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite) avec le modèle RSM*



*Figure 145. Champ de vitesse adimensionalisé proche de la grille pour un débit de 15l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite) avec le modèle RSM*



**Figure 146.** Champ de pression proche de la grille pour un débit de 15l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite) avec le modèle RSM



**Figure 147.** Champ d'énergie cinétique turbulente proche de la grille pour un débit de 15l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite) avec le modèle RSM

Concernant le champ d'énergie cinétique turbulente (*Figure 147*), on observe toujours le même comportement, avec de forts gradients à l'extrémité des bandelettes métalliques. Pour 15 l/s, les zones les plus fortes atteignent  $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Pour un débit de 50 l/s, on arrive à une valeur d'énergie cinétique turbulente supérieure à  $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

### Bilan

Les phénomènes physiques observés à proximité de la grille pour un débit nominal sont également visibles aux autres débits. En revanche, la valeur de ces phénomènes est accentuée avec l'augmentation du débit. Ces valeurs sont rapportées dans le *Tableau 18*.

Débit (l/s)	Vitesse tangentielle (m/s)	Différence de pression $\Delta P$ (Pa)	Energie cinétique turbulente ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
15	0,361	30	0,01
25	0,717	150	0,035
50	1,749	700	0,1

**Tableau 18.** Variables obtenues à proximité de la grille en fonction du débit.

## II. COMPORTEMENT HYDRAULIQUE A L'ECHELLE DE L'OUVRAGE

L'objectif du modèle global est de reproduire l'écoulement à l'échelle de l'ouvrage. Plus précisément, les variables que l'on cherche à modéliser sont les champs de vitesse, la répartition des débits, les pertes de charge à travers la grille, l'allure de la surface libre,... Toutes ces variables seront confrontées aux données expérimentales obtenues sur le pilote et permettront d'estimer le domaine de validité du modèle. En effet, la grille étant modélisée via une approche conceptuelle, nous devons déterminer l'influence de l'utilisation d'un milieu poreux pour modéliser la grille en observant les différences entre les deux approches.

Les trois débits étudiés lors de l'étude expérimentale sont testés via le modèle global. L'ensemble des simulations réalisées avec ce modèle est rapporté dans le *Tableau 19*. Même si le modèle de turbulence qui ressort principalement de l'étude bibliographique est le modèle *RSM*, une analyse de sensibilité sera réalisée dans le but d'analyser leur performance en fonction du temps de simulation pour chaque modèle. D'autre part, si la finesse du maillage pour le modèle local est grandement conditionnée par le fait que l'on modélise l'écoulement au sein de la couche limite, la sensibilité du maillage du modèle global mérite d'être analysée.

	<b>Modèle</b>	<b>Débit injecté (l/s)</b>	<b>Temps de calcul (h)</b>
1	<i>RANS + <math>k-\varepsilon</math></i>	25	10
2	<i>RANS + <math>k-\varepsilon</math> RNG</i>	25	10
3	<i>RANS + RSM</i>	25	15
4	<i>RANS + RSM</i>	15	15
5	<i>RANS + RSM</i>	50	15

*Tableau 19. Simulations réalisées avec le modèle global*

## 1. EVALUATION DE L'INCERTITUDE NUMERIQUE

Un moyen d'évaluer l'incertitude numérique est d'utiliser la méthode de Roache (1994) qui consiste à calculer le GCI (indice de convergence du maillage) à partir de différents maillages. Cette méthode permet d'estimer l'incertitude numérique liée à l'utilisation d'un maillage donné, connaissant les résultats obtenus avec un ou plusieurs autres maillages. Dans l'équation (27),  $r$  est le rapport de raffinement au maillage ;  $p$ , l'ordre de précision spatiale (égal à l'ordre du schéma numérique utilisé) ;  $R_{fine}$ , le résultat obtenu pour le maillage le plus fin ;  $R_{coarse}$ , le résultat obtenu pour le maillage le plus grossier.

$$GCI_{fine} = \frac{3 \left| \frac{R_{coarse} - R_{fine}}{R_{fine}} \right|}{r^p - 1} \quad (27)$$

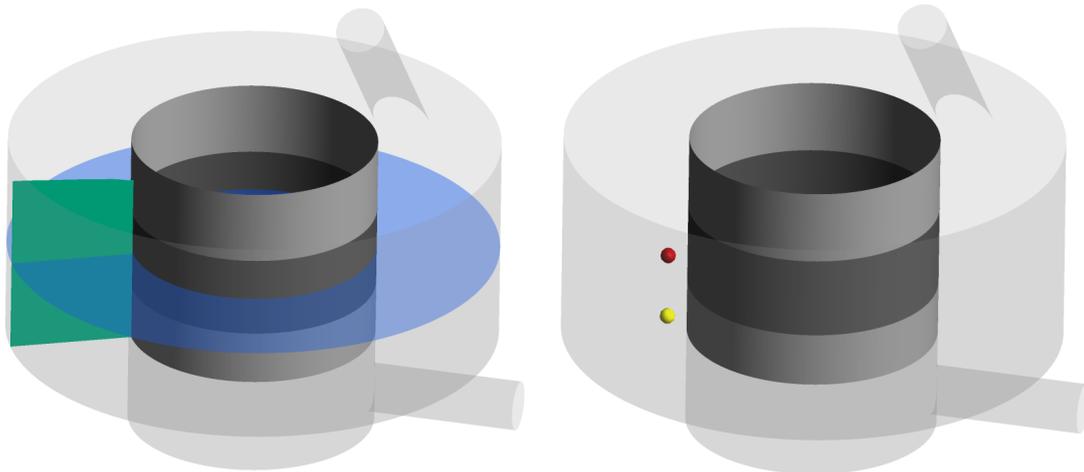
Les trois maillages décrits dans la *Partie 3* nous ont permis de réaliser deux tests. Le test 1 consiste à comparer le maillage grossier avec le maillage intermédiaire, et le test 2 consiste à comparer le maillage intermédiaire avec le maillage fin. Les paramètres de ces tests sont consignés dans le *Tableau 20*.

	Test 1	Test 2
Rapport de raffinement $r$	1.2	1.6
Précision spatiale $p$	2	2

*Tableau 20. Paramètres utilisés pour le calcul du GCI*

Le calcul du GCI est effectuée sur :

- le champ de vitesse médian à la grille ( $z = 0,38$  m), représenté par un plan bleu sur la *Figure 148*
- la vitesse moyenne sur la section (à  $\Theta = 180^\circ$ ), représentée par un plan vert sur la *Figure 148*
- vitesse moyenne proche de la grille, représentée par un point rouge sur la *Figure 148* ( $z = 0,38$  m;  $R = 0,59$  m et à  $\Theta = 180^\circ$ )
- la vitesse moyenne sous la grille ( $z = 0,11$  m;  $R = 0,59$  m et à  $\Theta = 180^\circ$ ), représentée par un point jaune sur la *Figure 148*



*Figure 148. Critère de comparaison des GCI: variables globales (à gauche) et variables locales (à droite)*

Les résultats des différentes variables ainsi que les GCI pour les différents tests sont visibles via le *Tableau 21*.

	<b>Maillage fin</b>	<b>Maillage intermédiaire</b>	<b>Maillage grossier</b>	<b>GCI Test 1</b>	<b>GCI Test 2</b>
Vitesse moyenne en circulation	0,70 m/s	0,69 m/s	0,71 m/s	19 %	3 %
Vitesse locale proche de la grille	0,89 m/s	0,89 m/s	0,94 m/s	39 %	1 %
Vitesse locale sous la grille	0,86 m/s	0,86 m/s	0,94 m/s	60 %	1 %

*Tableau 21. Valeurs des variables et des GCI pour les différents tests*

Les indices calculés montrent que le maillage le plus grossier a une incertitude numérique très grande (de 19 % à 60 %). En revanche, le maillage intermédiaire est suffisant pour reproduire les champs de vitesse et les variables locales, avec des différences respectives avec le maillage fin de 3 % à 1 %. De plus, l'observation du GCI dans le plan médian (*Figure 149*) permet de mettre en évidence les zones susceptibles d'être plus ou moins sensibles. Si globalement l'incertitude numérique est inférieure à 10 %, on constate que proche des parois extérieures ou très proche de la grille, l'incertitude est supérieure à 10 %.

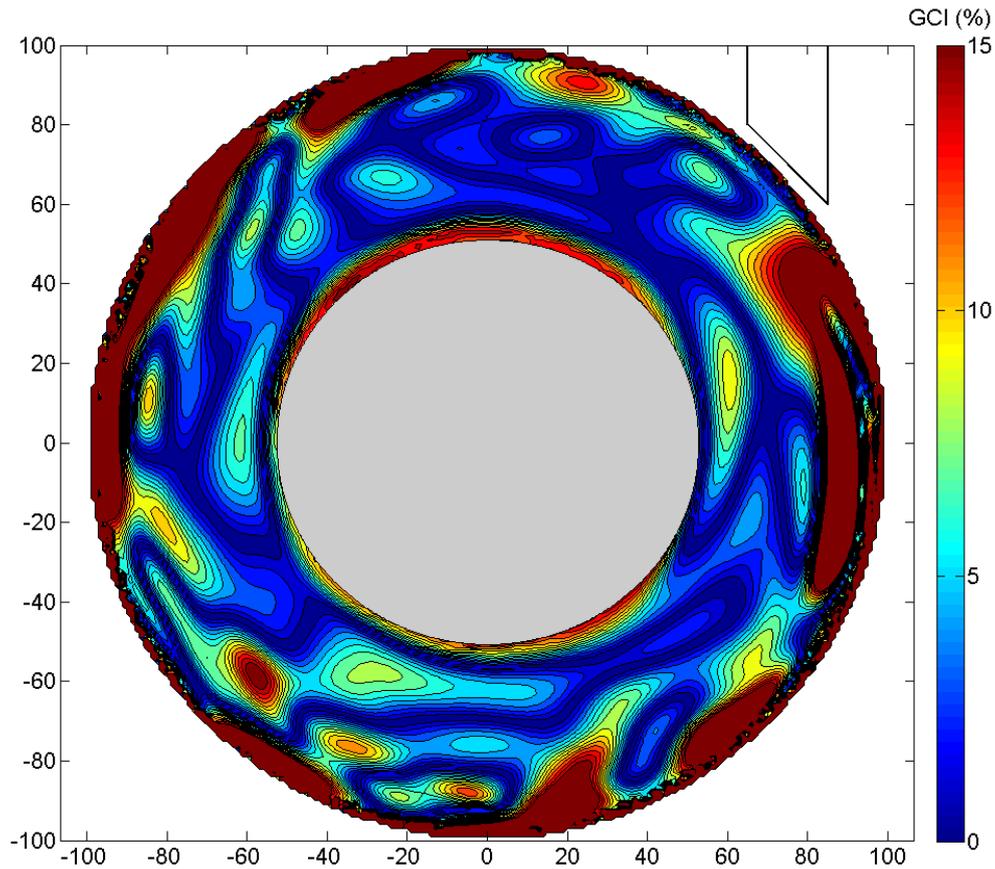


Figure 149. GCI pour le test 1 calculé à partir des vitesses dans le plan  $z = 0,38 \text{ m}$

La comparaison des deux maillages les plus fins (test 2) permet également d'estimer une valeur exacte en utilisant l'extrapolation de Richardson, également présentée par Roache (1994). Cette valeur exacte est estimée en utilisant l'équation ci-dessous.

$$R_{exact} = R_{fine} + \frac{R_{fine} - R_{coarse}}{r^p - 1} \quad (28)$$

En utilisant cette équation ainsi que les deux maillages les plus fins, on obtient des valeurs très proches de celles obtenues avec le maillage intermédiaire. La vitesse moyenne exacte est de 0,71 m/s, la vitesse proche de la grille de 0,90 m/s et la vitesse sous la grille de 0,86 m/s.

### Bilan

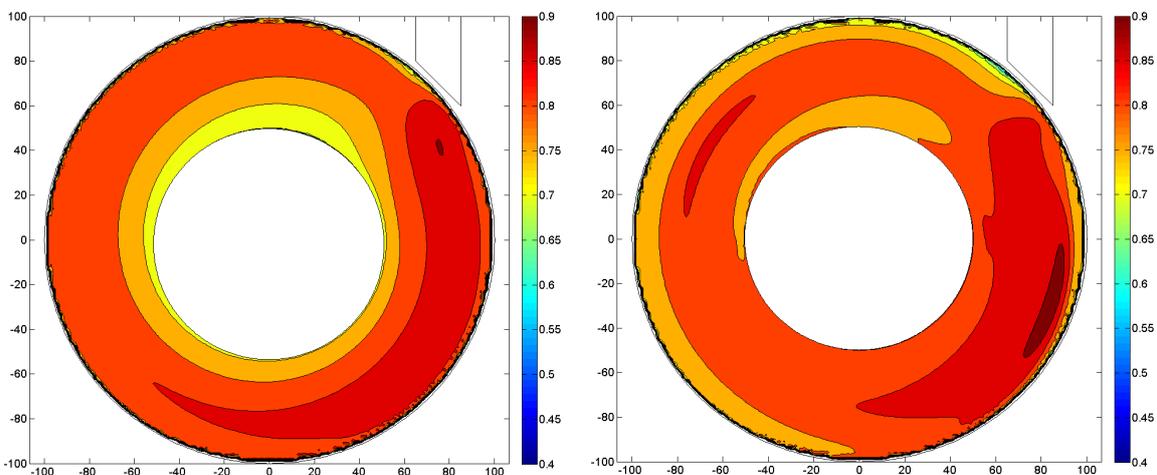
En résumé, on peut dire que le maillage intermédiaire contenant 1 200 000 cellules est suffisant pour reproduire un écoulement avec une incertitude compatible avec l'utilisation des résultats.

## 2. CONFRONTATION DES MODELES DE TURBULENCE

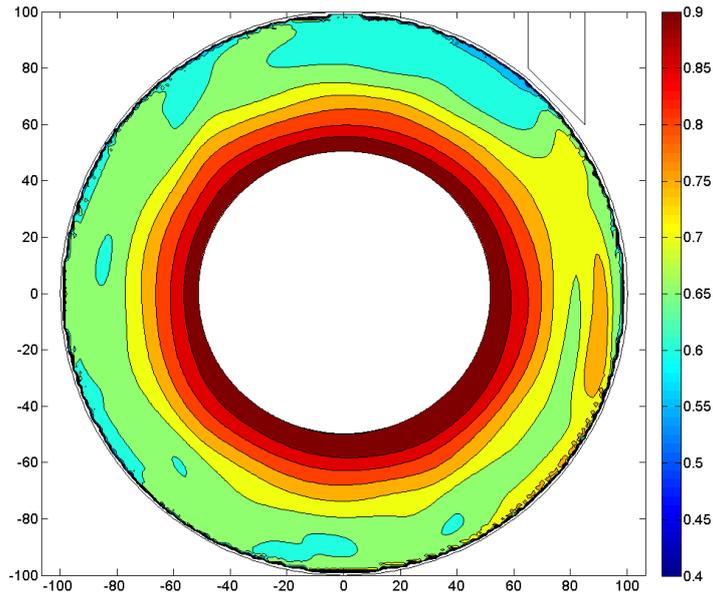
L'étude de sensibilité au modèle de turbulence est discutée dans cette partie. Si la différence en temps de calcul n'est pas énorme pour le modèle local, on a de grandes différences pour le modèle global de l'ouvrage. L'utilisation d'un modèle anisotrope est plus long de 5 h soit 50 % de temps de plus par rapport à un modèle isotrope. Il est donc intéressant d'observer l'influence du choix d'un modèle sur le comportement hydraulique de l'ouvrage.

Au niveau des champs de vitesses horizontaux (plan médian à la grille), on constate que l'écoulement diffère en fonction du modèle de turbulence. Pour un modèle isotrope (*Figure 150*), on constate une certaine homogénéité, avec des vitesses allant de 0,9 m/s pour des zones proches de l'entrée à 0,7 m/s à proximité de la grille pour un modèle  $k-\varepsilon$ . L'utilisation du modèle  $k-\varepsilon$  RNG, validé dans de nombreux cas pour les écoulements tourbillonnaires ou rotationnels, permet d'obtenir des vitesses plus importantes proches de la grille (0,75 m/s). Mais l'allure générale de l'écoulement ne correspond pas aux résultats attendus. Par contre, le modèle anisotrope  $RSM$  (*Figure 151*) permet d'obtenir un écoulement avec un gradient de vitesse opposé à celui obtenu avec les modèles isotropes. Avec ce modèle, les zones de fortes vitesses se situent à proximité de la grille (environ 0,9 m/s) et les zones de faibles vitesses au niveau des parois extérieures (environ 0,6 m/s).

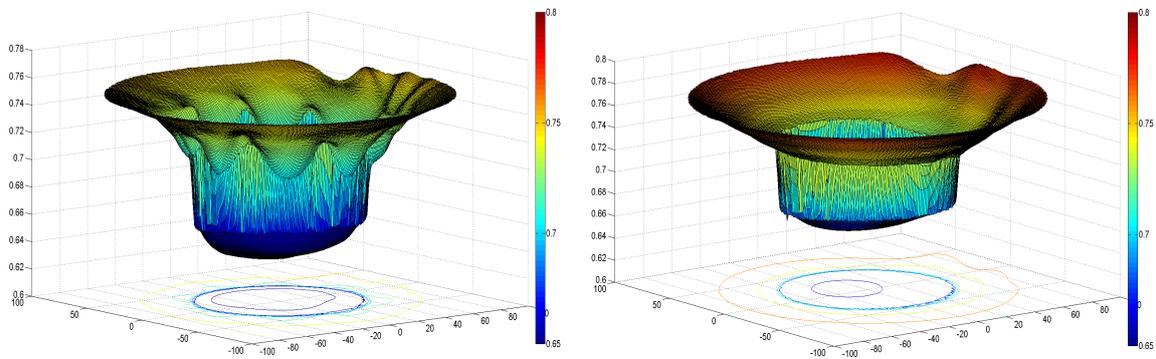
En plus du champ de vitesse, nous avons remarqué des différences entre les modèles sur l'allure des surfaces libres. Si les deux modèles permettent de modéliser une onde stationnaire certainement provoquée par la conduite d'entrée, on constate que l'utilisation d'un modèle  $RSM$  permet d'observer en plus des ondulations au niveau de la paroi centrale, qui ne sont pas reproduites par le modèle  $k-\varepsilon$  (*Figure 152*).



**Figure 150. Champ de vitesse horizontal (en m/s) dans le plan médian ( $z=0,38m$ ) pour un débit nominal en utilisant un modèle de turbulence isotrope  $k-\varepsilon$  (à gauche) et  $k-\varepsilon$  RNG (à droite)**



**Figure 151.** Champ de vitesse horizontale (en m/s) dans le plan médian ( $z=0,38m$ ) pour un débit nominal en utilisant un modèle de turbulence anisotrope RSM



**Figure 152.** Allure de la surface libre (en m) pour un débit nominal en utilisant un modèle de turbulence RSM (à gauche) et  $k-\epsilon$  (à droite)

## Bilan

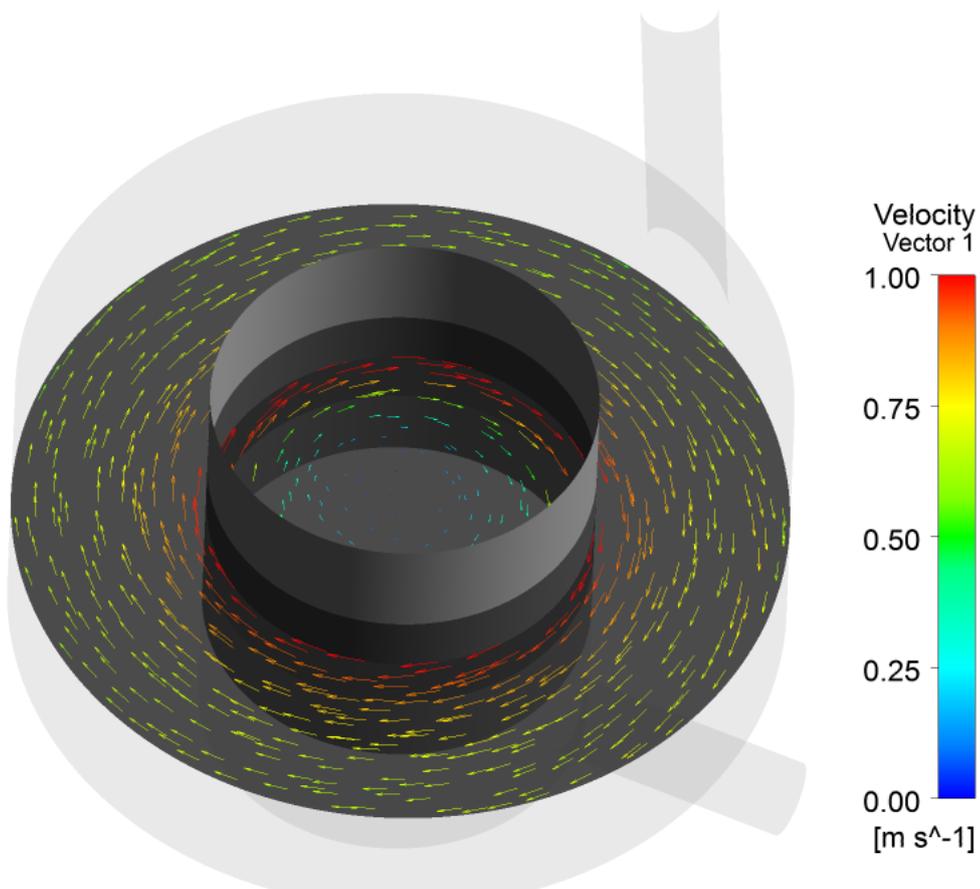
La confrontation des modèles de turbulence a montré deux différences majeures. Les gradients de vitesses obtenus avec les modèles isotropes sont différents de celui obtenu avec le modèle anisotrope. Cette différence est très importante car elle démontre la nécessité de valider le modèle avec des données expérimentales. D'autre part, le modèle RSM a mis en évidence la présence d'ondes stationnaires au niveau de la paroi centrale, non-simulé avec un modèle isotrope.

### 3. COMPARAISON AVEC L'EXPERIMENTAL (DEBIT NOMINAL)

#### 3.1 Ecoulement

Comme discuté dans la *Partie 3*, la technique adoptée pour modéliser l'écoulement au sein du milieu poreux ne permet pas de reproduire l'écoulement opposé dans la partie centrale. La *Figure 153* montre le sens de l'écoulement obtenu avec le modèle *RSM*. L'écoulement dans la partie centrale de l'ouvrage est dans le même sens que dans la partie extérieure.

Étant donné que notre étude concerne essentiellement l'écoulement dans la partie extérieure, le fait de reproduire l'écoulement dans le même sens dans la partie centrale n'est pas problématique. En effet, l'objectif principal de l'ouvrage est d'obtenir des vitesses suffisamment élevées à proximité de la grille pour éviter l'immobilisation de déchets favorisant le colmatage. Ainsi, la comparaison entre le numérique et l'expérimental se basera en grande partie sur l'écoulement dans la partie extérieure.



*Figure 153. Vecteurs vitesses dans le plan médian à la grille ( $z=0,38m$ ) avec le modèle RSM*

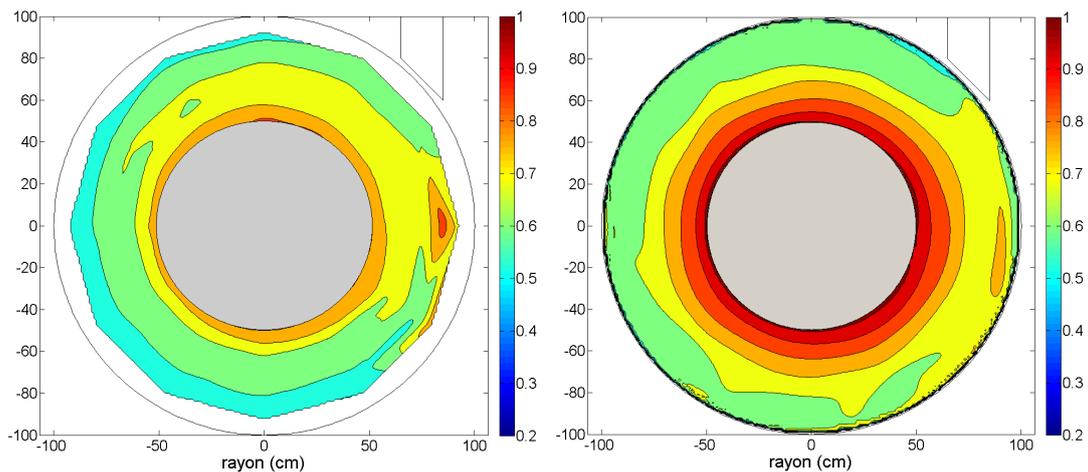
### 3.2 Champ de vitesse

Le modèle *RSM* semble être le plus à même de reproduire l'écoulement tourbillonnaire dans l'ouvrage. Ce modèle permet d'obtenir un gradient de vitesse donnant lieu à des vitesses importantes proche de la grille. Nous allons donc comparer les résultats obtenus avec ce modèle anisotrope avec les données expérimentales. Les critères de comparaison sont les mêmes qu'utilisés pour calculer l'incertitude numérique, à savoir :

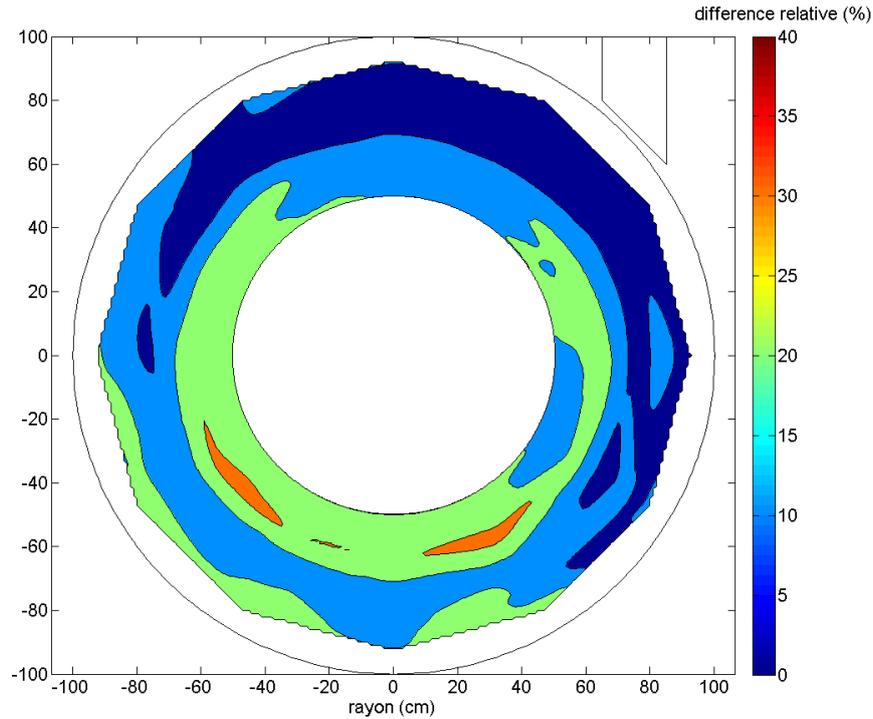
- les champs de vitesses horizontaux et verticaux
- les variables locales de vitesse à proximité et sous la grille

Ajoutons à ces critères une autre variable globale correspondant au rapport du débit en circulation sur le débit d'injection.

Concernant le plan horizontal ( $z = 0,38$  m), on constate que le modèle *RSM* coïncide avec les mesures expérimentales (*Figure 154*). Cela dit, le modèle surestime légèrement les vitesses et particulièrement proche de la grille. Pour quantifier ces différences, nous avons cartographié la "différence" relative entre les deux approches. En effet, il est difficile de parler d'erreur relative étant donné que le modèle utilise une grille différente (milieu poreux) de la réalité. Ainsi, la *Figure 155* montre que cette différence est globalement inférieure à 20 %.

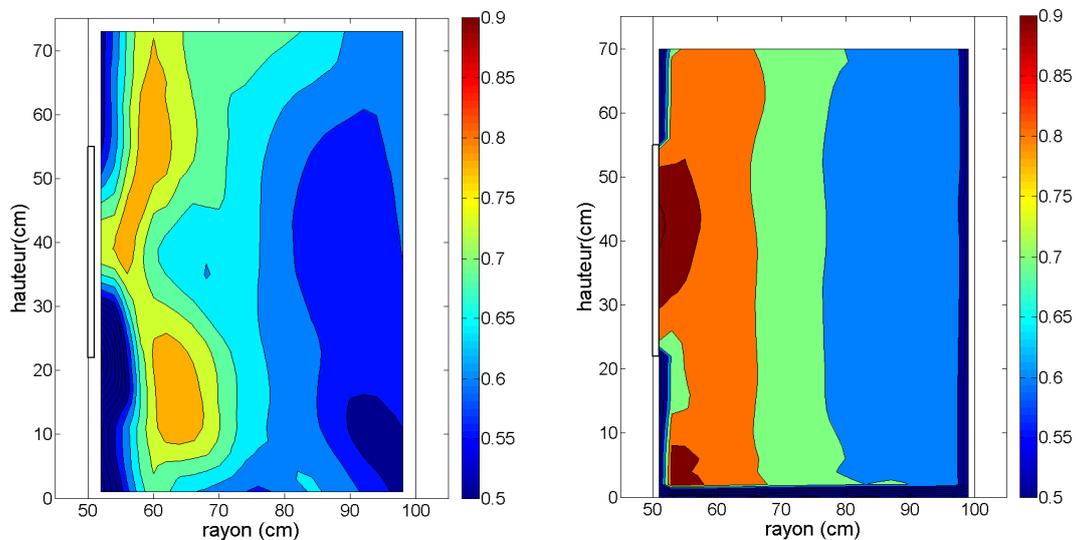


**Figure 154. Comparaison du champ de vitesse horizontal (en m/s) dans le plan médian ( $z=0,38$ m) entre l'expérimental (à gauche) et le modèle numérique *RSM* (à droite) pour un débit nominal de 25 l/s**



**Figure 155. Différence relative des champs de vitesses dans le plan médian ( $z=0,38m$ ) entre l'expérimental et le modèle numérique RSM pour un débit nominal de 25 l/s**

En s'intéressant à présent au plan vertical moyen ( $\Theta = 180^\circ$ ), on constate que le modèle permet de reproduire l'allure de l'écoulement sur la verticale, avec un champ de vitesse plus faible au niveau des parois extérieures et des vitesses importantes proche de la grille (*Figure 156*).



**Figure 156. Comparaison des champs de vitesses tangentielles (en m/s) dans le plan vertical ( $z, \Theta = 180^\circ$ ) entre l'expérimental (à gauche) et le modèle numérique RSM (à droite) pour un débit nominal de 25 l/s**

A partir des champs de vitesses verticaux, on est capable de déterminer la vitesse moyenne par intégration (29) ainsi que le débit de passage en multipliant la vitesse moyenne par la section de passage (30).

$$\overline{V}_t = \iint V_t . dS \quad (29)$$

$$\overline{Q}_{circulation} = \overline{V}_t \times \overline{S}_{mouillée} \quad (30)$$

	Expérimental	Modélisation numérique	Différence relative
Vitesse moyenne $V_t$	0,67 m/s	0,69 m/s	3%
Débit en circulation $Q_c$	242 l/s	249 l/s	3%
Rapport des débits $Q_c/Q_e$	9,7	10,0	3%
Vitesse proche de la grille $V_g$	0,73 m/s	0,89 m/s	22%
Vitesse sous la grille $V_{sg}$	0,76 m/s	0,86 m/s	13%

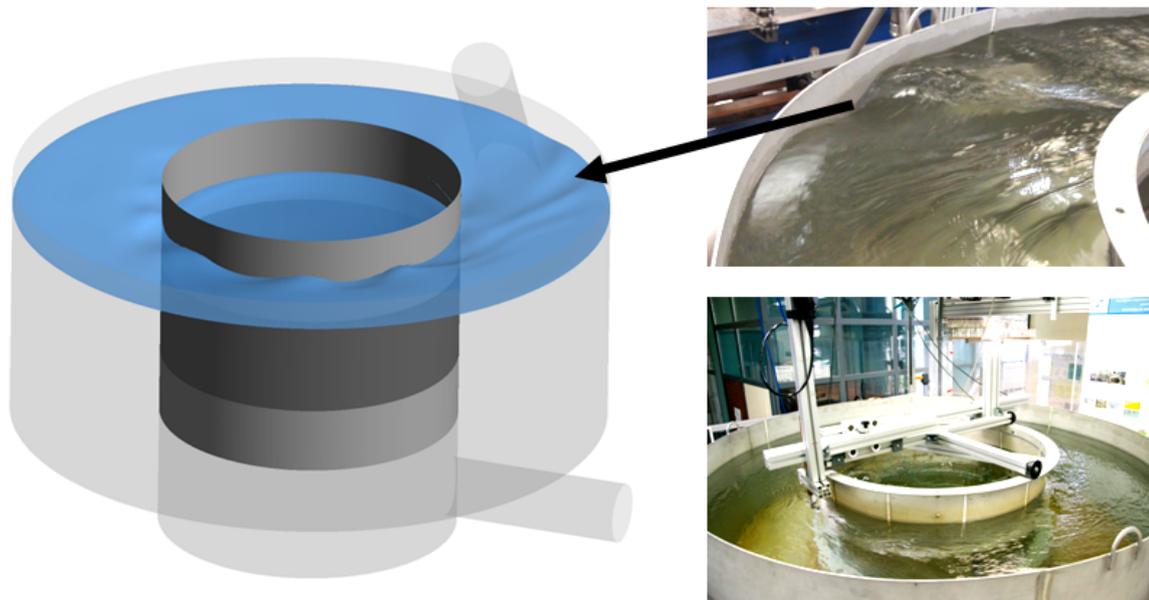
*Tableau 22. Comparaison des variables globales et locales entre l'expérimental et le modèle RSM*

Le *Tableau 22* présente les résultats des autres critères de comparaison. La vitesse moyenne  $V_t$  est calculée à partir de l'équation (29) et le débit en circulation  $Q_c$  à partir de l'équation (30). Le rapport entre le débit en circulation  $Q_c$  sur le débit injecté  $Q_e$ . Le tableau rapporte également la vitesse moyenne située à 9 cm de la grille et à mi-grille ( $z = 0,38$  m) ainsi que la vitesse moyenne sous la grille (à 9 cm de la paroi et à  $z = 11$  cm).

Concernant les valeurs, on constate que le modèle *RSM* permet de reproduire le comportement global de l'ouvrage avec une différence relative de 3 %. En revanche, l'approche conceptuelle mise en place pour simplifier la grille ne permet pas de reproduire finement le comportement hydraulique proche de la grille. Les variables locales présentent une différence relative supérieure à 15 %.

### 3.3 Surface libre

Une autre variable importante à analyser est la surface libre. Visuellement, nous avons observé les ondulations provoquées par la conduite d'entrée (*Figure 157*). En plus de cela, nous avons vu que le modèle *RSM* se distinguait d'un modèle isotrope par la modélisation d'ondes stationnaires au niveau de la paroi centrale. Ces ondes sont également visibles via l'expérimentation.



**Figure 157. Observation des surfaces libres entre le modèle (à gauche) et l'expérimental (à droite)**

L'analyse des hauteurs d'eau entre l'amont et l'aval de la grille est possible en observant le *Tableau 23*.

L'importante différence de hauteur entre l'amont et l'aval de la grille obtenue par la simulation numérique s'explique par le moyen utilisé pour modéliser les pertes de charge. En effet, le milieu poreux ne permet pas de reproduire la perte de vitesse entre l'amont et l'aval de la grille. Par conséquent, la perte de charge est liée principalement aux différences piézométriques entre l'amont et l'aval. En résumé, pour reproduire la bonne perte de charge, le modèle numérique compense les pertes d'énergie cinétique par une perte d'énergie potentielle plus importante, ce qui explique les différences entre les hauteurs d'eau à l'aval de la grille.

Concernant l'inclinaison de la surface libre, on obtient des valeurs assez proches entre les deux approches avec une inclinaison de  $5,7^\circ$  pour la modélisation ( $4,6^\circ$  pour l'expérimental).

	<b>Expérimental</b>	<b>Modélisation numérique</b>
<b>Hauteur de la surface libre à l'extérieur de la grille (R=0,5m)</b>	0,76 m	0,72 m
<b>Hauteur de la surface libre à l'intérieur de la grille</b>	0,72 m	0,65 m
<b>Différence de hauteur d'eau</b>	0,04 m	0,07 m

**Tableau 23. Comparaison des hauteurs d'eau entre l'expérimental et le modèle RSM**

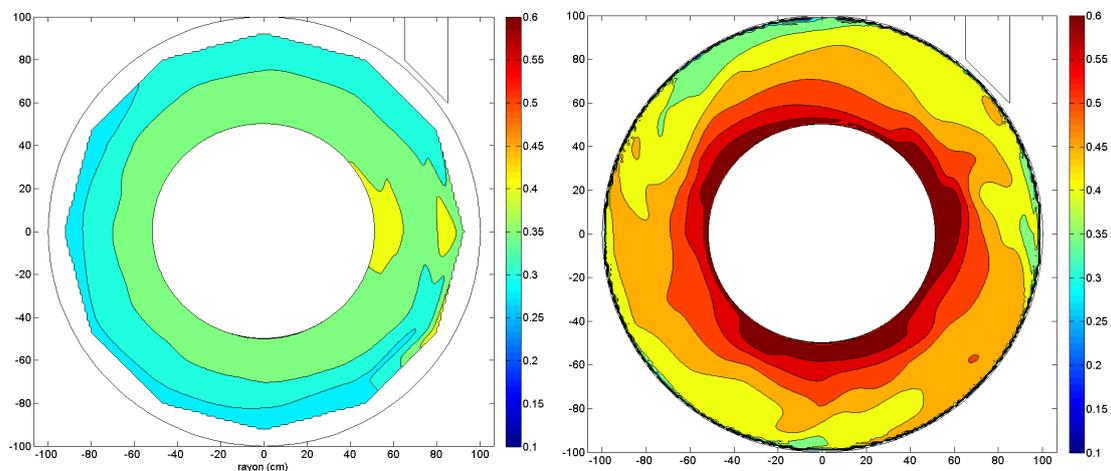
## Bilan

La confrontation entre l'approche expérimentale et les simulations obtenues avec le modèle *RSM* a permis de montrer que les modèles isotropes  $k-\varepsilon$  et  $k-\varepsilon$  *RNG* ne permettaient de reproduire les gradients de vitesse recherchés. L'utilisation d'un modèle *RSM* permet de retrouver les variables globales comme les débits en circulation ou les vitesses moyennes en circulation avec une différence relative d'environ 3 %, et ceci malgré l'approche conceptuelle de grille. En revanche, l'utilisation d'un milieu poreux ne permet pas de réorienter la direction de l'écoulement dans la partie centrale. De plus, si l'allure de la surface libre (inclinaison et position des ondes stationnaires) est bien reproduite dans la partie extérieure du pilote, l'approche ne permet pas de reproduire la différence de hauteur entre l'extérieur et l'intérieur de la grille mesurée expérimentalement.

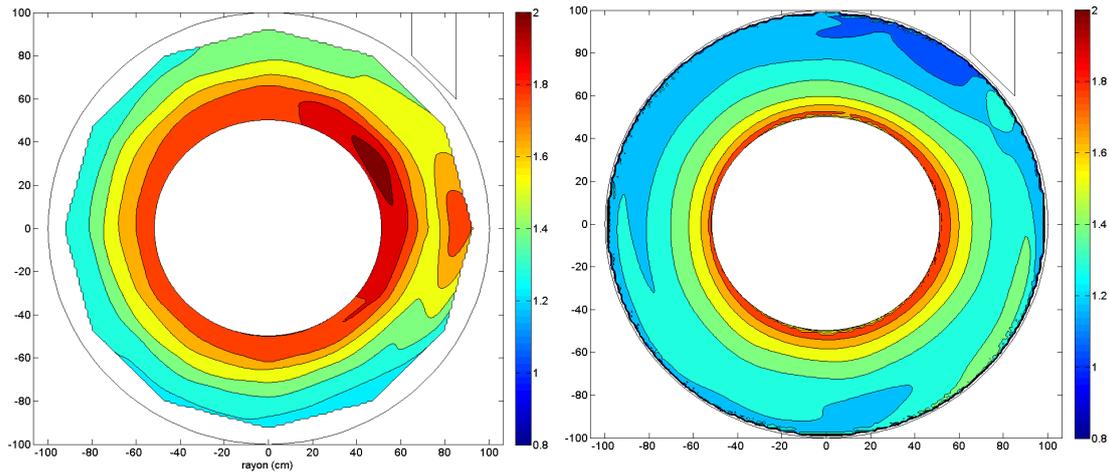
### 3.4 Influence du débit sur le champ de vitesse

En plus du débit nominal, nous comparons dans cette partie les caractéristiques hydrodynamiques pour des débits de 15 et 50 l/s (simulations 4 et 5 du *Tableau 19*).

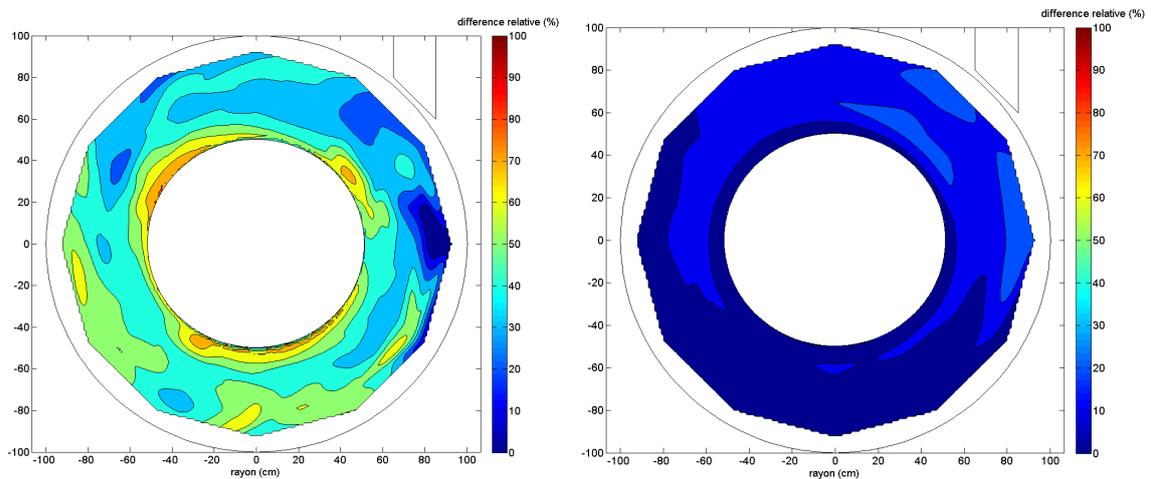
Pour un débit de 15 l/s, le modèle ne reproduit pas correctement le champ de vitesse équivalent à l'expérimental (*Figure 158*). La simulation a tendance à surestimer la valeur des vitesses pour des petits débits. On estime à environ 35 % la différence relative du modèle par rapport à l'expérimentation (à gauche dans la *Figure 160*). Pour des débits de 50 l/s, la simulation est très proche du comportement observé via l'expérience (*Figure 159*). Le modèle a même tendance à sous-estimer la valeur des vitesses. La différence relative est inférieure à 20 % (à droite dans la *Figure 160*).



**Figure 158.** Comparaison du champ de vitesse horizontal (en m/s) dans le plan médian ( $z=0,38m$ ) entre l'expérimental (à gauche) et le modèle numérique *RSM* (à droite) pour un débit de 15 l/s



**Figure 159.** Comparaison du champ de vitesse horizontale (en m/s) dans le plan médian ( $z=0,38m$ ) entre l'expérimental (à gauche) et le modèle numérique RSM (à droite) pour un débit de 50 l/s



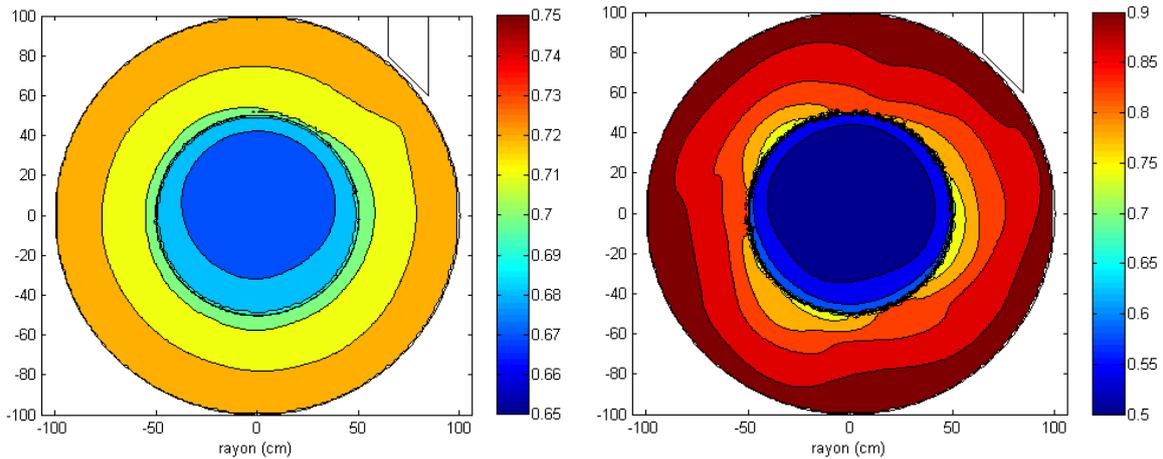
**Figure 160.** Différence relative des champs de vitesse dans le plan médian ( $z=0,38m$ ) entre l'expérimental et le modèle numérique RSM pour un débit de 15 l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite)

### 3.5 Influence du débit sur la surface libre

Si l'influence du débit est visible sur le champ de vitesse, il joue également un rôle sur l'allure de la surface libre. La *Figure 161* met en évidence les hauteurs d'eau obtenues par la modélisation pour les deux débits.

A 15 l/s, la surface libre est très plane. Dans la partie extérieure de la grille, on obtient des hauteurs d'eau allant de 0,73 m à 0,71 m (à gauche dans la *Figure 161*). En revanche, on observe une forte inclinaison de la surface libre pour des débits de 50 l/s (à droite dans la *Figure 161*). Les hauteurs d'eau passent d'environ 0,90 m au niveau des parois extérieures jusqu'à 0,76 m proche de la grille.

Ces constats sont très proches des observations expérimentales. Le *Tableau 24* permet d'identifier quantitativement les différences d'inclinaisons entre l'expérimental et le numérique.



**Figure 161.** Hauteurs d'eau (en m) obtenues avec le modèle numérique RSM pour un débit de 15 l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite)

Débit (l/s)	Inclinaison via expérimental	Inclinaison via modélisation
15	1,7°	2,9°
50	15,6°	16,7°

**Tableau 24.** Comparaison de l'inclinaison de la surface libre dans la partie extérieure du pilote entre l'expérimental et le modèle RSM

De plus, et déjà discuté pour un débit de 25 l/s, la modélisation montre des différences de hauteurs d'eau entre l'amont et l'aval de la grille (Tableau 25). En augmentant le débit d'injection, on augmente les pertes de charges. Ceci implique une augmentation importante de la différence de niveau entre l'extérieur et l'intérieur de la grille. En prenant par exemple un débit de 50 l/s, on obtient via la simulation une différence de niveau de 0,205 m alors que l'expérimentation nous donne 0,05 m. La différence entre les deux approches provient du fait que le modèle transforme les 0,15 m d'énergie cinétique (correspondant à une vitesse de 1,71 m/s) principalement en énergie potentielle.

Ces résultats montrent une autre limite de l'approche multi-échelle. En utilisant une approche par milieu poreux via une surface, le modèle conceptuel ne permet pas de reproduire la hauteur d'eau dans la partie centrale du pilote. Les vitesses étant importantes à proximité de la grille, le modèle ne permet pas de réduire subitement les vitesses lors du passage de l'écoulement à travers le milieu poreux. Ainsi, pour reproduire les pertes de charge, le modèle compense la perte d'énergie cinétique par une perte d'énergie potentielle. Une illustration de cette explication est présentée sur la Figure 162.

	Débit	Expérimental	Modélisation numérique
Hauteur de la surface libre à l'amont de la grille (R=0,5m)	15 l/s	0,735 m	0,710 m
	50 l/s	0,690 m	0,765 m
Hauteur de la surface libre à l'aval de la grille	15 l/s	0,733 m	0,685 m
	50 l/s	0,640 m	0,560 m
Différence de hauteur d'eau	15 l/s	0,002 m	0,025 m
	50 l/s	0,050 m	0,205 m

Tableau 25. Comparaison des hauteurs d'eau à l'extérieur et à l'intérieur de la grille entre l'expérimental et le modèle RSM

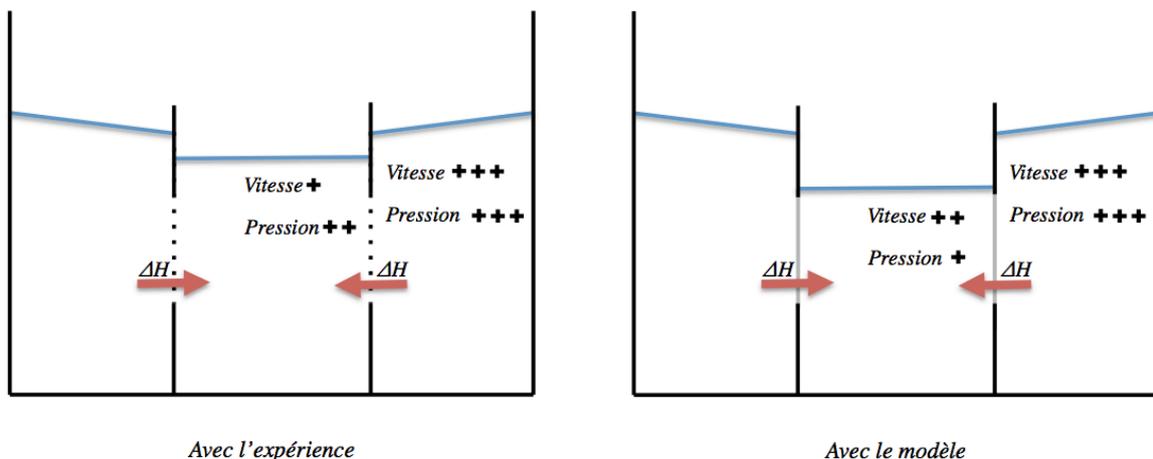


Figure 162. Conséquences des pertes de charge de la grille sur la surface libre : approche expérimentale (à gauche) et numérique (à droite)

## Bilan

La comparaison des vitesses et des hauteurs d'eau entre les simulations et l'expérimental pour plusieurs débits a permis d'expliquer la mauvaise reproduction des hauteurs d'eau dans la partie centrale de l'ouvrage avec le modèle. L'approche conceptuelle par un milieu poreux permet de reproduire les pertes de charge. Cependant, au sein du modèle cette perte se fait essentiellement sous forme potentielle (perte importante de pression), alors qu'en réalité il y a également une perte d'énergie cinétique importante.

### III. TRANSPORT SOLIDE

La validation des modèles numériques pour l'écoulement permet à présent d'utiliser l'approche lagrangienne pour observer la trajectoire des particules. Cependant, l'une des limites de l'approche multi-échelle est qu'elle ne permet pas de tester l'efficacité réelle de l'ouvrage via une approche numérique. Le modèle à l'échelle de l'ouvrage étant modélisé par une grille conceptuelle de type milieu poreux, cela ne permet pas de reproduire l'influence des phénomènes locaux sur les particules. D'autre part, le modèle local ne permet pas de prendre en compte le fait qu'une particule puisse tourner continuellement autour de la grille. Malgré ces limites, l'utilisation de l'approche lagrangienne est tout de même intéressante. Elle va nous permettre d'étudier l'influence des phénomènes physiques sur les particules. De plus, l'utilisation du modèle à l'échelle de l'ouvrage nous permettra de déterminer l'influence des propriétés des particules sur les phénomènes de sédimentation.

#### 1. ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE A PROXIMITE DE LA GRILLE

Comme nous l'avons expliqué dans la *Partie 3*, l'étude du transport solide au sein du modèle local a pour objectif :

- de comparer l'impact des caractéristiques des particules sur l'efficacité
- de visualiser l'influence des propriétés hydrodynamiques sur la trajectoire des particules
- d'étudier l'influence du débit sur l'efficacité de séparation

##### 1.1 Caractéristiques des particules

Les paramètres des particules sont choisis pour représenter au mieux les particules dans les ouvrages en assainissement pluvial. Cependant, l'étude bibliographique a montré que les séparateurs avaient du mal à retenir des particules inférieures à 75  $\mu\text{m}$ . De ce fait, les plus petites particules testées correspondent au diamètre médian  $d_{50} = 35 \mu\text{m}$ . Les diamètres utilisés sont de 35, 100, 200, 500, 700, 1000, 1200 et 1500  $\mu\text{m}$ . La densité des particules rencontrées étant parfois très étendue en fonction de leur diamètre, nous avons utilisé une plage allant de 1040  $\text{kg/m}^3$  à 2500  $\text{kg/m}^3$ .

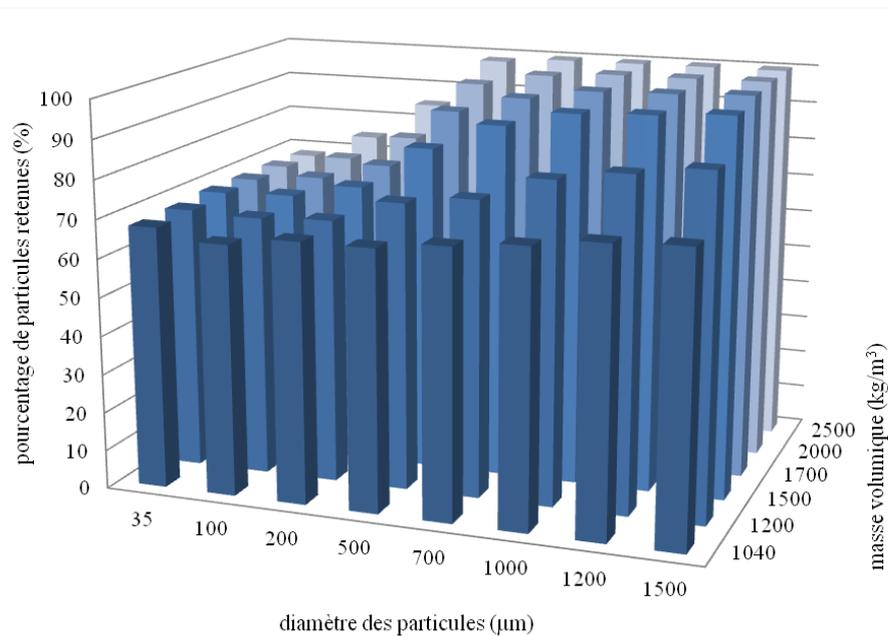
##### 1.2 Analyse de l'efficacité de séparation de la grille

###### Influence des caractéristiques des particules

La capacité des grilles à retenir des particules est ici jugée à partir de l'équation (26) définie dans la *Partie 3*. A partir du modèle local, l'application du suivi de particule permet de tester la sensibilité des

caractéristiques des particules. Pour un écoulement correspondant au débit nominal (simulation 3 du *Tableau 17*), plusieurs analyses peuvent être effectuées à partir des résultats obtenus et rapportés dans la *Figure 163*.

La modélisation de particules très fines (35  $\mu\text{m}$ ) montre la faible influence de la masse volumique. Le pourcentage de particules retenues est constant (environ 65 %) pour les particules de 1040 à 2500  $\text{kg/m}^3$ . De même, pour les particules 1040  $\text{kg/m}^3$ , il est possible de constater que le diamètre des particules n'intervient que très peu dans l'efficacité. En revanche, pour des masses volumiques supérieures à 1500  $\text{kg/m}^3$  et des diamètres supérieurs à 500  $\mu\text{m}$ , l'efficacité a tendance à croître.



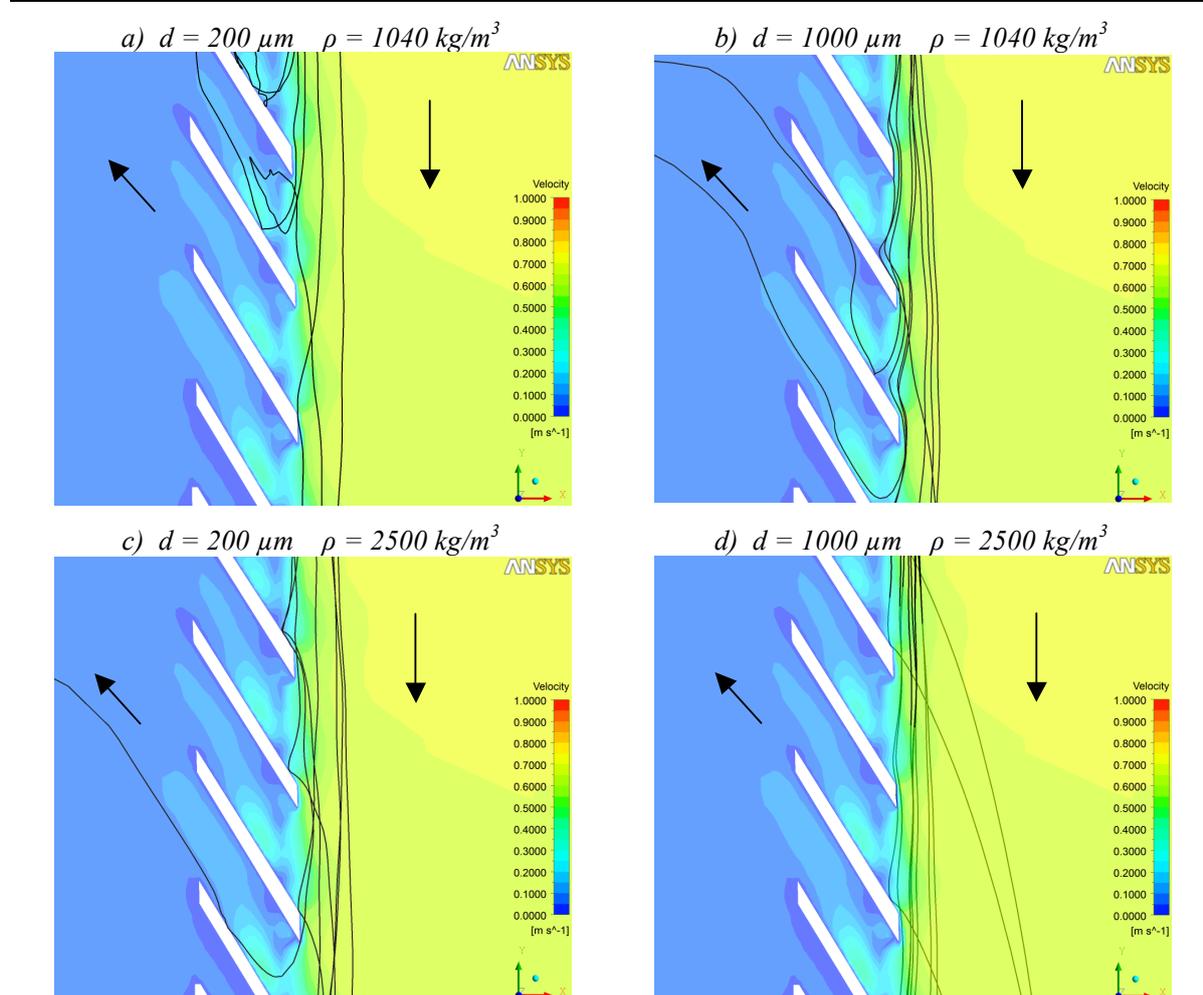
**Figure 163.** Pourcentage des particules retenues pour différentes caractéristiques de particules et pour un débit de 25 l/s

### Trajectoires des particules et interactions fluide/particules

L'hypothèse la plus plausible pour expliquer les résultats illustrés ci-dessus est certainement l'influence des caractéristiques des particules sur les phénomènes physiques. Dans la partie précédente, la modélisation de l'écoulement a permis de mettre en avant l'influence de la forme particulière de la grille sur les phénomènes hydrodynamiques, en particulier :

- le champ de vitesse, vecteur du transport solide ;
- le gradient de pression, permettant d'expulser des particules ;
- un taux d'énergie cinétique turbulente, favorisant la dispersion des particules.

Il est donc pertinent de s'intéresser à la trajectoire des particules à proximité de la grille en fonction des caractéristiques de l'écoulement. Nous avons choisi de représenter des particules de tailles et de masses volumiques bien distinctes dans l'objectif d'observer des différences de comportement. Les caractéristiques des particules illustrées ci-dessous possèdent des diamètres de 200  $\mu\text{m}$  et 1000  $\mu\text{m}$  pour des masses volumiques de 1040  $\text{kg}/\text{m}^3$  et 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$ .



**Figure 164. Trajectoires de 10 particules pour différentes caractéristiques avec le champ de vitesse pour un débit de 25 l/s**

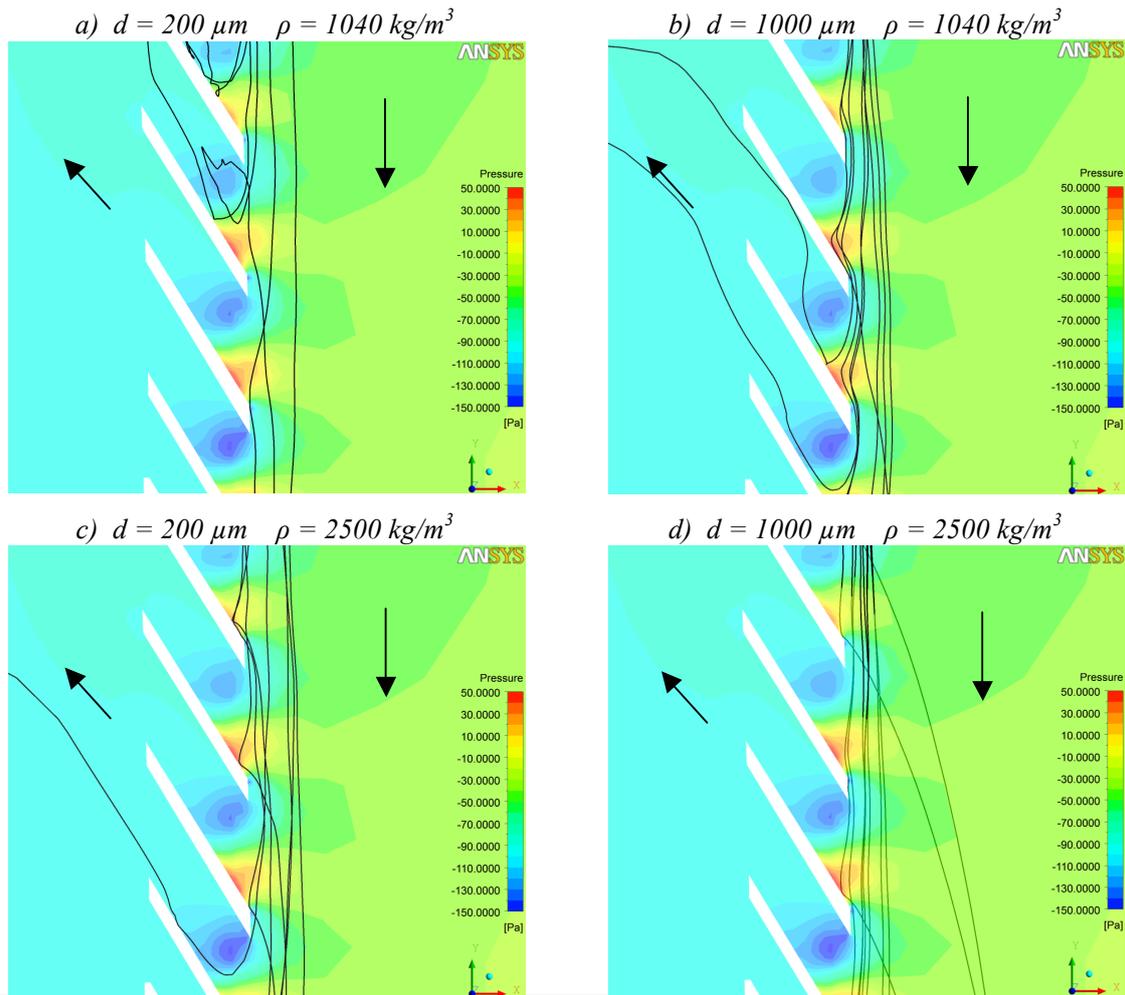
En s'intéressant dans un premier temps aux particules légères (200  $\mu\text{m}$  et 1040  $\text{kg}/\text{m}^3$ ), on observe que celles traversant la grille sont entraînées dans la recirculation (cas *a*). Notons que ce phénomène a également été visualisé sur le pilote expérimental. L'augmentation de la masse des particules permet de contourner la recirculation présente dans l'entrefer (cas *b* et *c*). Concernant les particules très lourdes (1000  $\mu\text{m}$  et 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$ ), leur importante inertie ne leur permet pas de traverser la grille. En effet, pour les particules lourdes (cas *d*) l'impact avec la grille se fait à l'extrémité de la bandelette métallique. On peut observer qu'elles sont légèrement déviées vers l'intérieur puis ressortent aussitôt

dans l'écoulement à l'extérieur de la grille. Pour résumer, la trajectoire est fortement dépendante des caractéristiques physiques des particules. En fonction de ces caractéristiques, l'inertie des particules sera différente. Plus les particules seront lourdes, plus le mouvement des particules à suivre l'écoulement opposé dans la grille sera compliqué.

D'autre part, l'analyse de la trajectoire des différentes particules et le lien avec l'hydrodynamique permet de dégager certaines hypothèses sur les résultats obtenus. Si l'analogie avec les champs de vitesse (*Figure 164*) montre uniquement la direction prise par les particules qui ont traversé la grille, les champs de pression (*Figure 165*) et d'énergie cinétique turbulente (*Figure 166*) nous donnent d'avantage d'informations sur le comportement des particules à l'amont de la grille. Les gradients de pression et le taux d'énergie cinétique provoqués à l'amont de la grille susciteraient un avantage considérable sur l'efficacité locale de la grille. L'ensemble des phénomènes hydrodynamiques que provoque la géométrie de la grille favorise l'éjection des particules. Les particules disposant d'une importante inertie (particules lourdes) à l'amont de la grille ne pourront jamais traverser la grille. En revanche, celles possédant une faible inertie (particules légères) peuvent potentiellement se retrouver dans une zone favorable à l'éjection.

## **Bilan**

L'étude du transport solide à proximité de la grille a permis de mettre en avant l'influence des caractéristiques des particules sur leurs trajectoires. Les particules lourdes ne peuvent pas traverser la grille en raison de leur forte inertie. Les particules légères sont soumises aux phénomènes physiques provoqués par la grille. Les gradients de pression et les taux d'énergie cinétique turbulente permettent d'éjecter les particules se trouvant à proximité des bandelettes de métal. Ces remarques sont également intéressantes par rapport au colmatage des macro-déchets. Si les phénomènes physiques provoqués par la forme de la grille favorisent l'éjection des particules, on peut faire l'hypothèse que ces phénomènes auront également une influence sur la présence de macro-déchets à proximité des orifices.



**Figure 165. Trajectoires de 10 particules pour différentes caractéristiques avec le champ de pression pour un débit de 25 l/s**

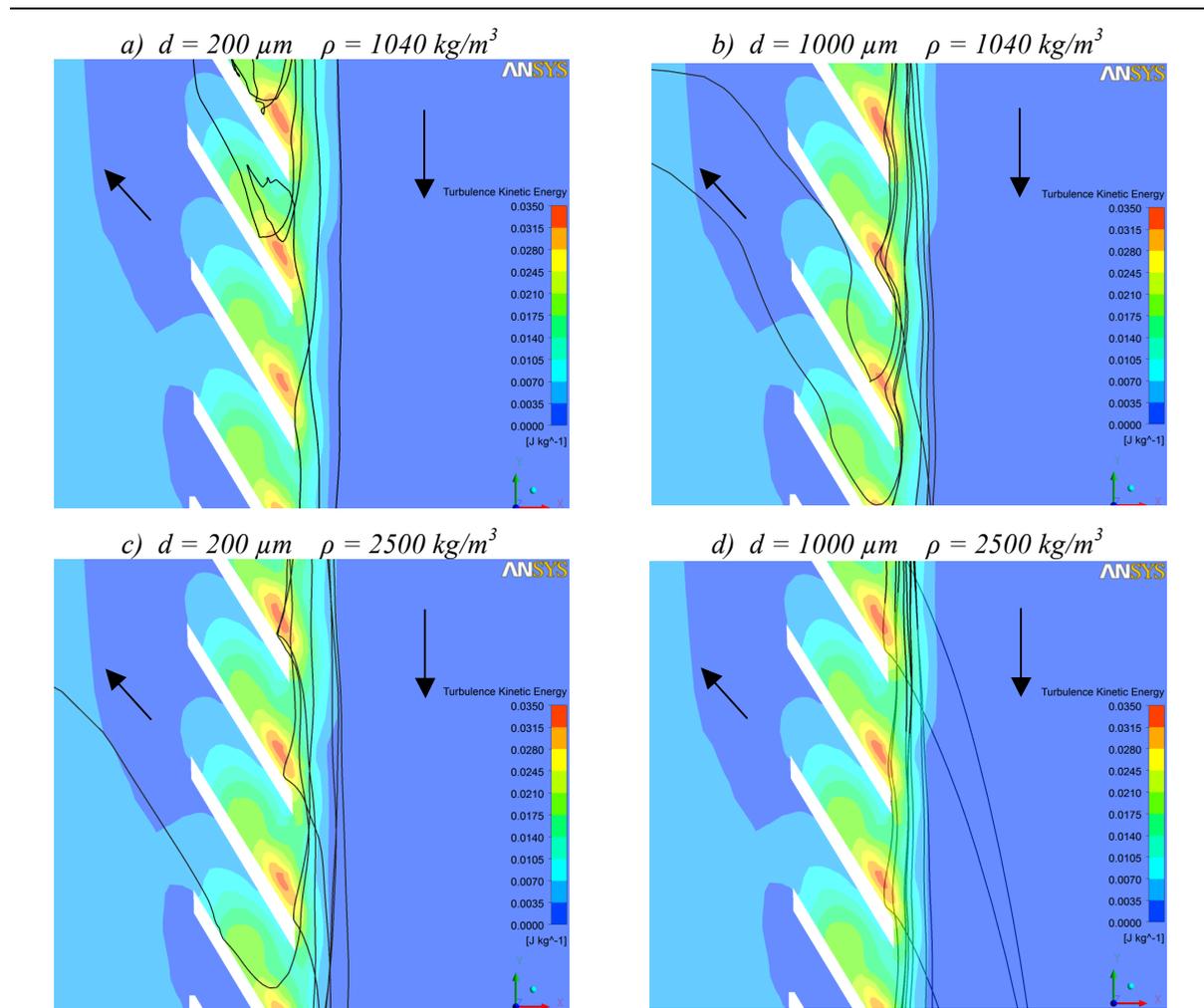


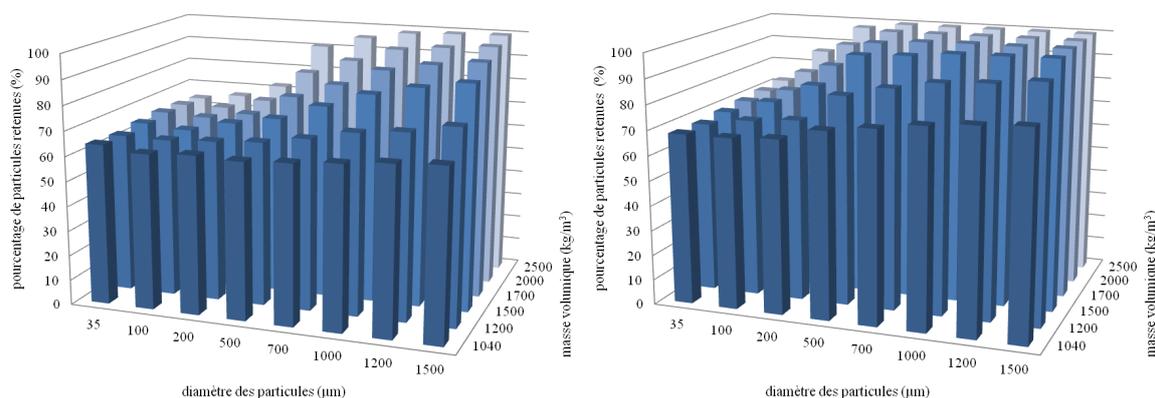
Figure 166. Trajectoires de 10 particules pour différentes caractéristiques avec le champ d'énergie cinétique turbulente

### 1.3 Influence du débit sur l'efficacité de séparation

Nous avons démontré auparavant que les phénomènes physiques étaient présents pour des faibles et forts débits. La seule différence qui subsistait entre les différents débits était la valeur des grandeurs physiques. L'objectif de ce paragraphe est de montrer l'influence de la valeur des grandeurs sur la rétention de particules.

L'augmentation du débit au sein de l'ouvrage se traduit également par une augmentation de la composante radiale de la vitesse. Ce constat laisse donc présager la diminution de l'efficacité de la grille. Cependant, l'approche lagrangienne utilisée pour qualifier l'efficacité démontre le contraire (Figure 167). Quelques soient les propriétés des particules, le pourcentage de particules récupérées est plus important pour les grands débits. Si cette observation n'est que légère pour des petites particules et de faibles masses volumiques, on remarque une différence importante pour les particules

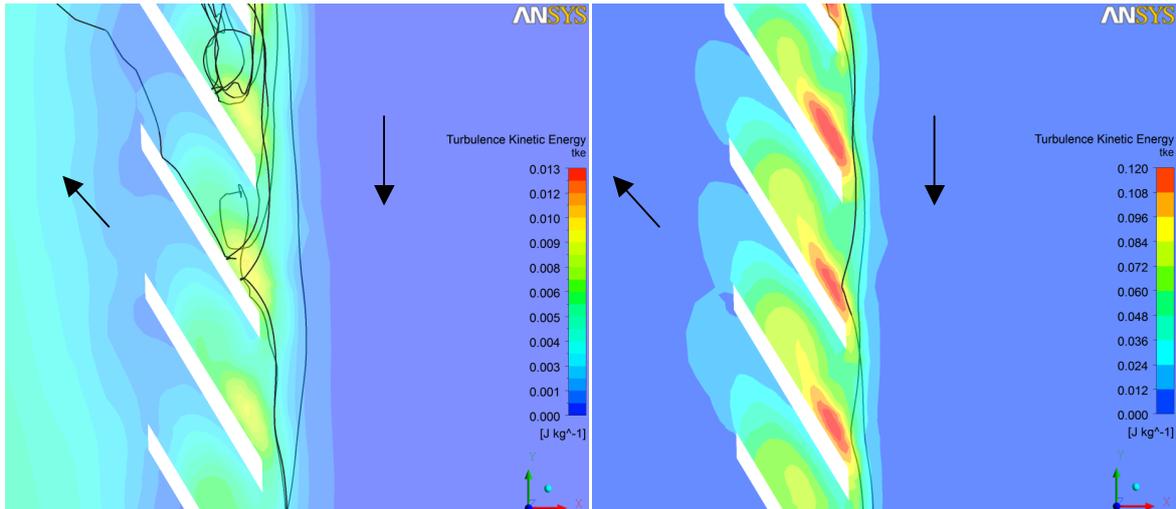
supérieures à  $500 \mu\text{m}$  et  $1200 \text{ kg/m}^3$ . En prenant pour exemple les particules d'un diamètre de  $500 \mu\text{m}$  et d'une masse volumique  $1500 \text{ kg/m}^3$ , l'efficacité est respectivement de 71% et 96% pour 15 et 50 l/s.



**Figure 167. Pourcentage des particules retenues pour différentes caractéristiques de particules pour un débit de 15 l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite)**

Par conséquent, l'hypothèse d'une accentuation des phénomènes physiques à proximité immédiate de la grille est totalement justifiée. L'illustration de la trajectoire des particules d'un diamètre  $200 \mu\text{m}$  et d'une masse volumique de  $2500 \text{ kg/m}^3$  (Figure 168) permet d'observer l'influence du champ d'énergie cinétique turbulente. A 50 l/s, les taux d'énergie cinétique turbulente sont plus marqués, avec des valeurs pouvant atteindre des seuils dix fois plus importants ( $0,12 \text{ m}^2/\text{s}^2$  pour 50 l/s et  $0,010 \text{ m}^2/\text{s}^2$  pour 15 l/s). Nous avons également vu que les différences de pressions étaient de 700 Pa à 50 l/s et seulement de 30 Pa pour 15 l/s (Tableau 18).

Par ailleurs, on visualise que pour 15 l/s, la particule vient cogner la bandelette métallique avant d'être redirigée vers l'intérieur ou l'extérieur de la grille. Au contraire, pour un débit de 50 l/s, les particules sont éjectées avant même d'atteindre la zone fortement turbulente (zone rouge). Cette observation laisse donc croire à l'existence d'une valeur seuil d'énergie cinétique turbulente permettant d'éjecter les particules.



**Figure 168.** Trajectoires de particules de 200 µm et 2500 kg/m<sup>3</sup> pour un débit de 15 l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite)

## 2. ÉTUDE DU TRANSPORT SOLIDE DANS LE PILOTE

L'étude de transport solide dans le pilote avec la méthode multi-échelle ne permet d'avoir qu'une estimation de l'efficacité. La grille étant modélisée par un milieu poreux, elle ne permet pas de reproduire les effets de contact entre les polluants et la grille. En revanche, le modèle peut être utilisé pour tester la sensibilité des particules sur les phénomènes de sédimentation ou encore pour visualiser la trajectoire des différentes particules.

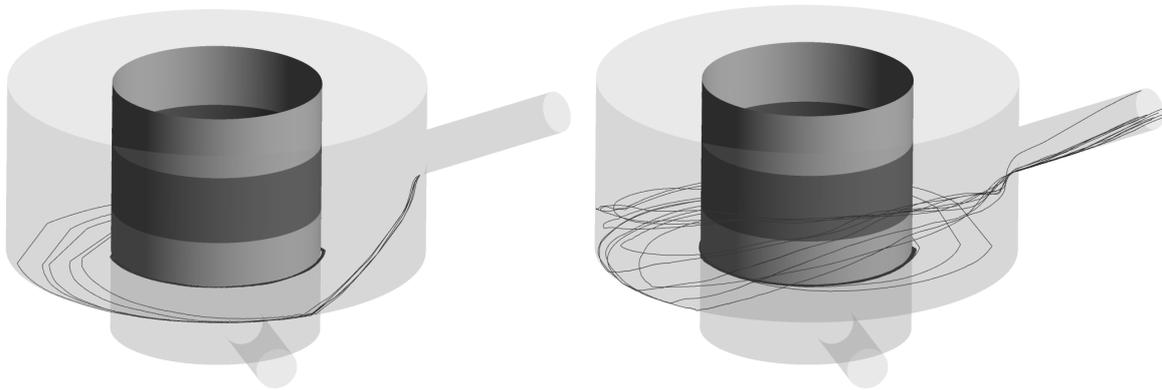
En plus de particules testées au sein du modèle local, nous avons choisi de simuler le transport des particules ayant les mêmes propriétés que celle utilisées pour les campagnes expérimentales. Le comportement de ces particules étant très variable, nous pourrions juger de la performance du modèle à reproduire les trajectoires.

### 2.1 Simulation de la trajectoire des particules utilisées pour les expérimentations

La première étape concernant le transport de particules consiste à observer les différences des trajectoires obtenues avec les approches expérimentale et numérique.

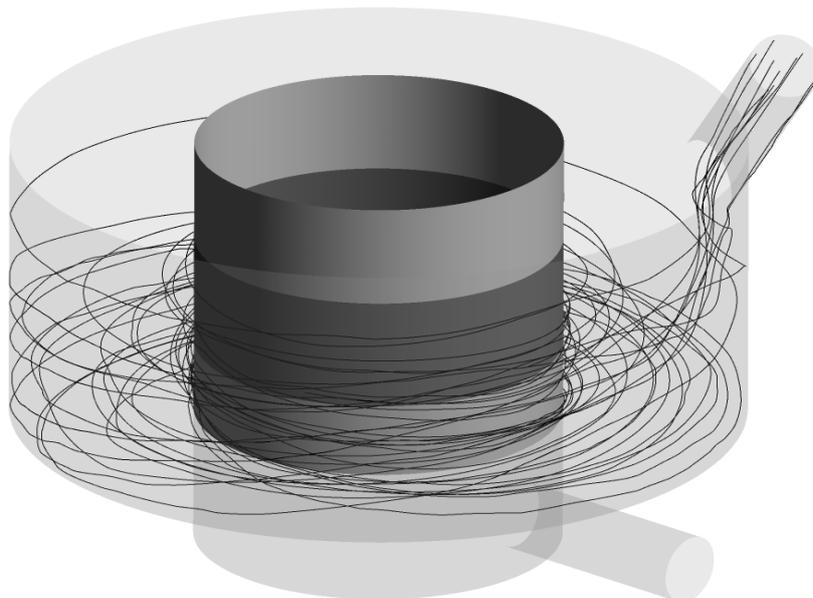
Le suivi de particules des billes en verre (à gauche sur la *Figure 169*) montre clairement la vitesse de sédimentation des particules et leur mise en circulation autour de l'anneau central. Concernant les particules de PET (à droite sur *Figure 169*), on constate un phénomène de transport en suspension intrinsèque qui dure un peu moins d'un tour. Par la suite, les particules de PET tournent au fond autour de l'anneau central.

Ces deux constats ont également été faits avec les expériences sur le pilote. Les billes en verres, très lourdes, sédimentent dès l'entrée dans l'ouvrage. Les particules de PET, moins lourdes, mettent un peu plus de temps à sédimenter (1 tour).



*Figure 169. Trajectoires des billes en verre (à gauche) et de particules de PET (à droite) dans le pilote pour un débit de 25 l/s*

Pour les particules de polystyrol, il est plus difficile de comparer avec l'expérimental étant donné que ces particules ne sédimentent pas et tournent autour de la grille. En revanche, on remarque que leurs trajectoires sont représentatives de celles observées expérimentalement. Les particules circulent contre la paroi extérieure avant d'être ramenées progressivement vers la grille (*Figure 170*).

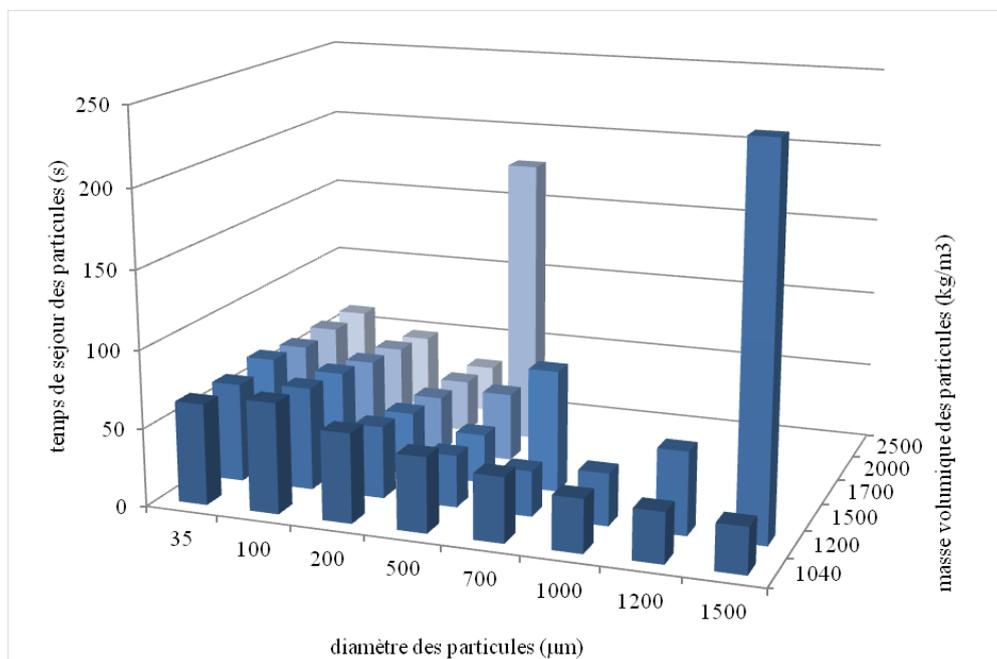


*Figure 170. Trajectoires des particules de polystyrol transparentes dans le pilote pour un débit de 25 l/s*

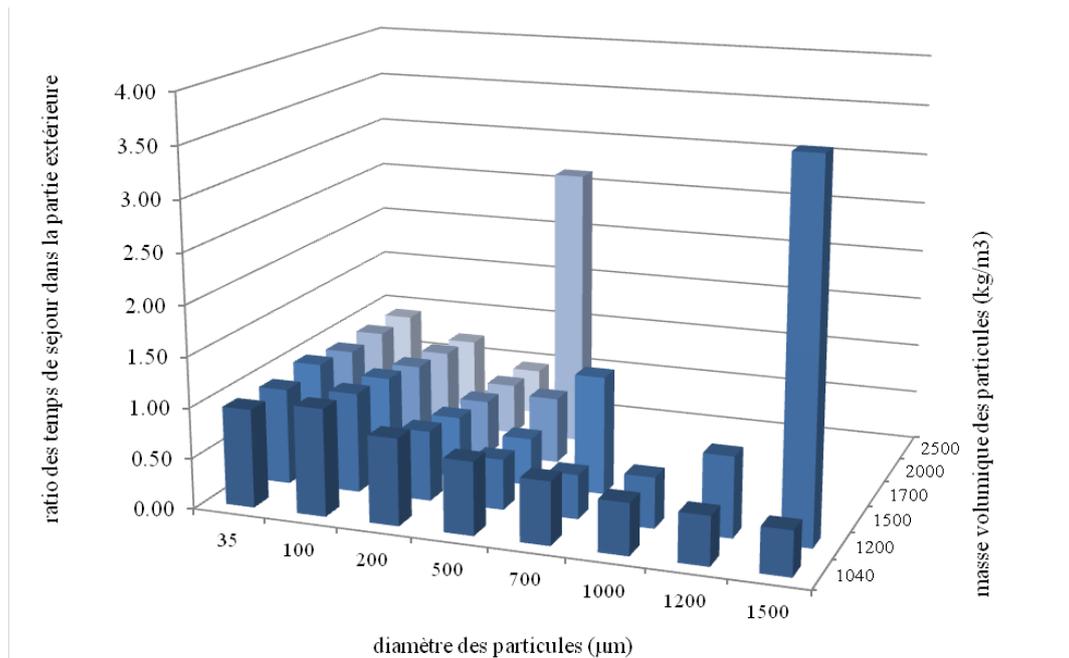
## 2.2 Etude du temps de séjour des particules

La validation du comportement des particules en fonction de leur diamètre et leur masse volumique permet à présent d'étendre la gamme des propriétés des particules.

La *Figure 171* met en évidence le temps de séjour moyen des particules avant leur passage par la grille en fonction des caractéristiques des particules. Sur ce graphique sont affichées uniquement les valeurs pour lesquelles toutes les particules ont atteint la grille. Les zones vides (absences de données) signifient que l'ouvrage retient toutes les particules dans l'ouvrage et qu'aucune ne traverse la grille. Dans ce cas, le temps de séjour est infini. Concernant les données, on constate que les petites particules (35 et 100  $\mu\text{m}$  de diamètre) ont un temps de séjour d'environ 60 secondes. Pour ce type de particules, la masse volumique n'influence pas le temps de séjour. Le mouvement de ce type de particules est donc complètement piloté par l'hydrodynamique. En revanche, lorsque le diamètre dépasse 200  $\mu\text{m}$ , le temps de séjour évolue avec la masse volumique pour un même diamètre. En prenant par exemple un diamètre de 500  $\mu\text{m}$ , le temps de séjour est d'environ 50 secondes pour une particule de masse volumique 1040  $\text{kg/m}^3$  alors que pour 2500  $\text{kg/m}^3$ , le temps de séjour est de 160 secondes. Ce constat s'explique par la différence de masse entre les particules. Les particules lourdes sédimentent et tournent moins vite autour de la grille. Ces phénomènes expliquent donc pourquoi en augmentant le diamètre et/ou la masse volumique, l'ouvrage permet de retenir la totalité des particules. D'autre part, on remarque que le temps de séjour diminue puis augmente d'un coup en fonction des caractéristiques des particules. L'explication de ce phénomène sera mise en évidence par l'observation des trajectoires dans le pilote (paragraphe *III 2.3*).



**Figure 171. Temps de séjour moyen des particules avant leur passage à travers la grille en fonction de leur masse volumique et leur diamètre pour un débit de 25 l/s**



**Figure 172. Ratio des temps de séjour moyen des particules et de l'eau avant leur passage à travers la grille en fonction de leur masse volumique et leur diamètre pour un débit de 25 l/s**

D'autre part, en comparant le temps de séjour des particules avec le temps de séjour hydraulique, on arrive à mettre en évidence les particules pilotées par l'hydrodynamique. Le temps de séjour hydraulique est calculé en divisant le volume d'eau dans la partie extérieure de l'ouvrage par le débit injecté (31).

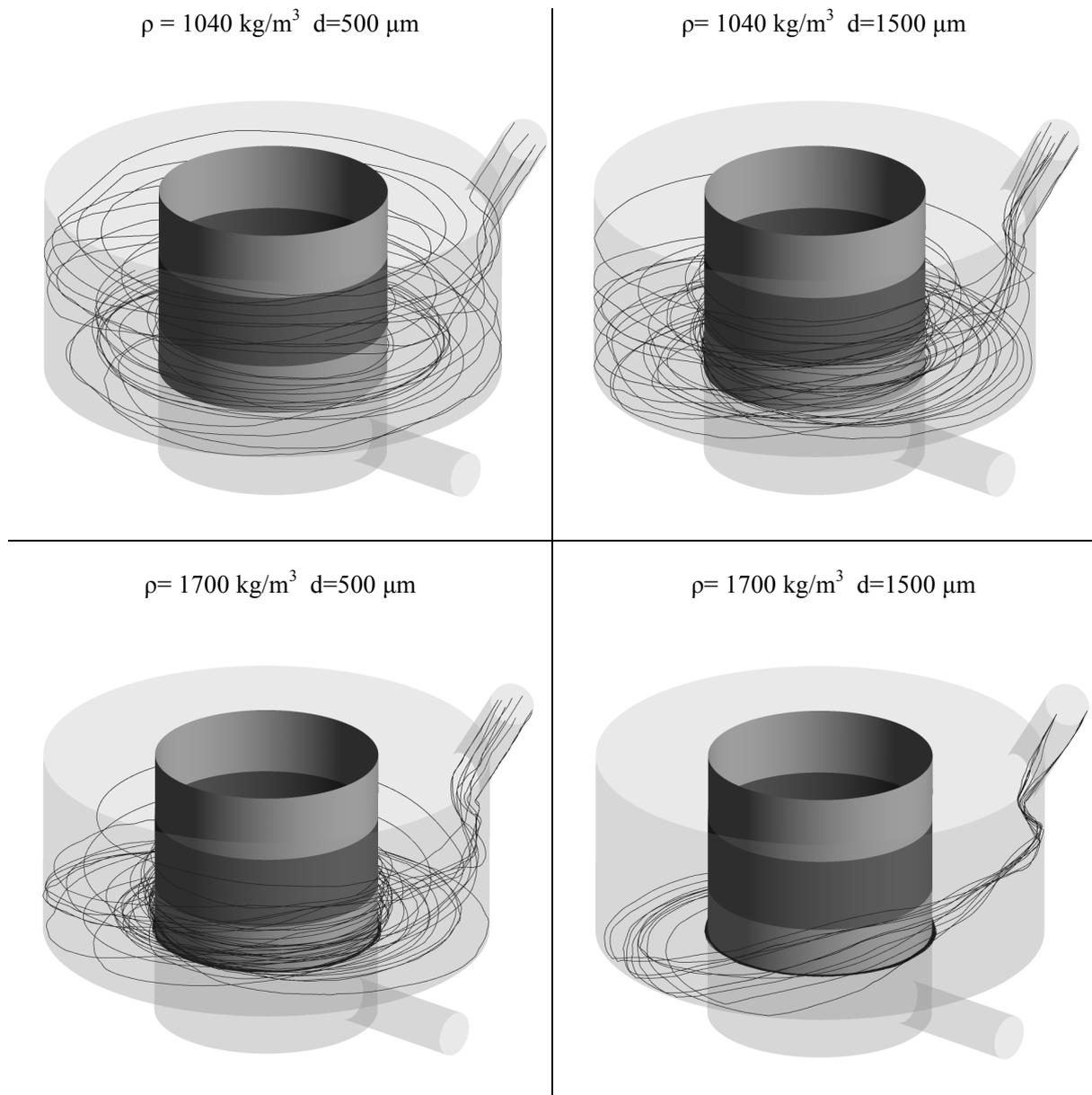
$$t = \frac{V}{Q_e} \quad (31)$$

avec  $t$  le temps de séjour hydraulique,  $V$  le volume d'eau et  $Q_e$  le débit d'injection.

La *Figure 172* montre le ratio des deux temps de séjour en fonction des caractéristiques des particules. L'observation d'un ratio proche de 1, montre que les particules de faible diamètre sont entièrement pilotées par l'hydrodynamique. Au contraire, un ratio supérieur à 1 montre l'effet concentrateur de l'ouvrage sur les particules étudiées (particules de diamètre 500 μm et une masse volumique de 2500 kg/m<sup>3</sup> et les particules de diamètre 700 μm et d'une masse volumique de 2200 kg/m<sup>3</sup> où les ratios sont proches de 3).

Avant d'observer des ratios supérieurs à 1, on remarque que le ratio a tendance à diminuer avec le poids des particules. Pour expliquer ces résultats, intéressons nous à la trajectoire des particules.

### 2.3 Trajectoires des particules et étude des processus de sédimentation



*Figure 173. Trajectoires de 10 particules en fonction de leur masse volumique et leur diamètre pour un débit de 25 l/s*

La visualisation de la trajectoire des particules est intéressante car elle permet de mieux comprendre les résultats discutés ci-dessus et de visualiser directement les phénomènes de sédimentation.

En comparant des particules de même masse volumique et de diamètre différent (en haut dans la *Figure 173*), on observe que les particules ayant un diamètre plus important sont plus présentes vers le centre. Ainsi, un gain de masse permet à la particule d'être entraînée plus rapidement vers la grille.

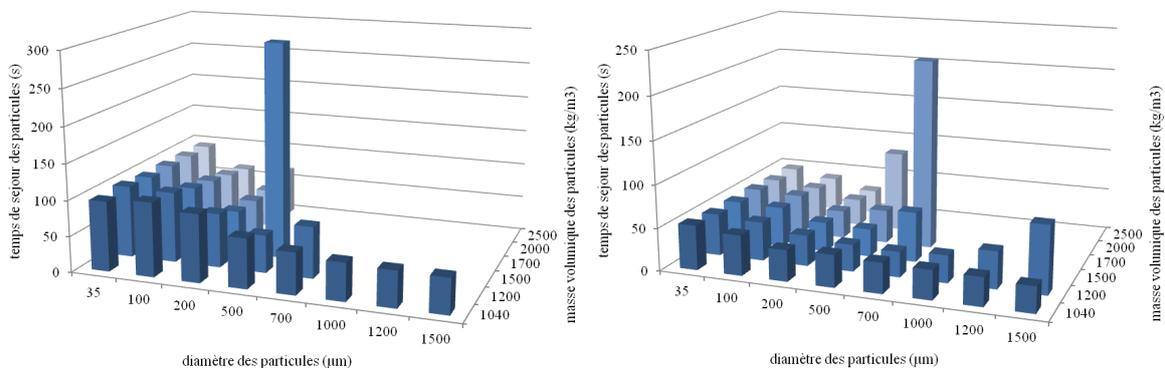
Ceci explique donc l'évolution décroissante du temps de séjour des particules lorsque le diamètre des particules augmente.

D'autre part, les deux images en bas de la *Figure 173* montrent clairement l'influence des propriétés des particules sur les processus de sédimentation. Pour une masse volumique importante ( $1700 \text{ kg/m}^3$ ) et un diamètre important ( $1500 \mu\text{m}$ ), les particules sédimentent directement et tournent au fond de l'ouvrage. Autant dire que les particules lourdes ne sont jamais en contact avec la grille. Ceci explique notamment la trajectoire des particules de PET et des billes en verre.

## 2.4 Influence du débit sur le transport solide

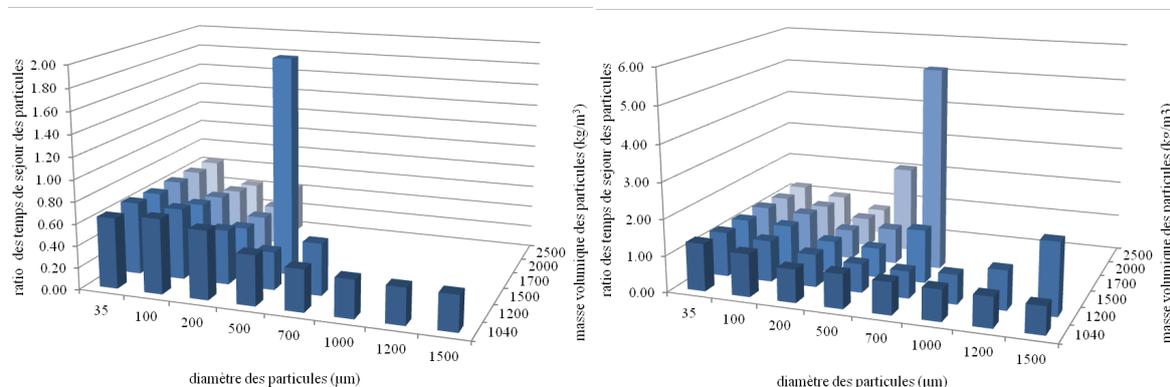
Le comportement des particules change en fonction des caractéristiques, mais aussi en fonction des propriétés du fluide porteur. Le débit d'injection dans l'ouvrage va influencer les champs de vitesse tangentielle et radiale, et par conséquent influencer le transport solide.

Les figures ci-dessous ont donc pour but de visualiser l'influence du débit sur les temps de séjour, mais aussi sur les phénomènes de sédimentation. Pour un débit de  $15 \text{ l/s}$  (à gauche dans la *Figure 174*), le temps de séjour moyen des particules avant le passage par la grille est plus important que pour un débit de  $25 \text{ l/s}$  (environ deux fois plus). Pour des débits de  $50 \text{ l/s}$ , le temps de séjour moyen est légèrement plus faible ( $20 \%$  en moins). De plus, la comparaison des deux graphiques de la *Figure 174* permet de démontrer l'efficacité de sédimentation en fonction du débit. Par exemple, pour un débit de  $15 \text{ l/s}$ , le pilote permet de retenir toutes les particules supérieures à  $500 \mu\text{m}$  et d'une masse volumique supérieure à  $1500 \text{ kg/m}^3$ . Par comparaison, à  $50 \text{ l/s}$  et pour une même masse volumique, le pilote retient seulement les particules supérieures à  $1000 \mu\text{m}$ .



**Figure 174. Temps de séjour moyen des particules avant leur passage à travers la grille en fonction de leur masse volumique et leur diamètre pour un débit de  $15 \text{ l/s}$  (à gauche) et  $50 \text{ l/s}$  (à droite)**

En plus du temps de séjour, la comparaison du ratio entre le temps de séjour moyen des particules et le temps de séjour du fluide montre que pour les faibles débits, les particules ne sont plus pilotées par l'hydrodynamique (*Figure 175*). Les valeurs des ratios entre 50 l/s et 15 l/s sont quasiment divisées par deux. Par exemple, pour des particules de 35  $\mu\text{m}$  de diamètre, les ratios pour 50 et 15 l/s passent respectivement de 1,2 à 0,6.



**Figure 175.** Ratio des temps de séjour moyen des particules et de l'eau avant leur passage à travers la grille en fonction de leur masse volumique et leur diamètre pour un débit de 15 l/s (à gauche) et 50 l/s (à droite)

## Bilan

Le suivi de particules au sein du modèle global a permis d'observer la cohérence des trajectoires des particules de polystyrol, de PET ou de billes en verre avec l'expérimental. Si le modèle à l'échelle de l'ouvrage ne permet pas de calculer une efficacité de rétention en raison de l'approche conceptuelle de grille, il permet en revanche d'observer l'influence des caractéristiques des particules sur les processus de sédimentation dans l'ouvrage. D'autre part, l'analyse des ratios de temps de séjour a permis de définir le type de particules pouvant être potentiellement retenu par la grille. Il s'agit des particules de faibles masses volumiques car celles-ci sont essentiellement pilotées par l'hydrodynamique.

## CONCLUSION DE LA PARTIE 4

L'objectif de ce chapitre était d'appliquer la méthode multi-échelle et de confronter les résultats de la modélisation avec les données expérimentales afin de conclure quant à la validité de cette approche.

La première partie consacrée à l'étude des phénomènes physiques se produisant à proximité immédiate de la grille a mis en avant l'influence du métal déployé sur la perturbation de l'écoulement. La forme spécifique de la grille provoque des gradients importants de vitesse, de pression et des zones de forte énergie cinétique turbulente à proximité des ouvertures. Le modèle numérique retenu permettant de reproduire au mieux ces phénomènes est le modèle *RSM*. Ce modèle permet de calculer des pertes de charge très proches de celles mesurées expérimentalement (2 % de différence avec l'expérience au débit nominal).

A plus grande échelle, la comparaison du modèle global avec les données expérimentales a montré les différences obtenues en homogénéisant le comportement de la grille par un milieu poreux. Du point de vue de l'écoulement, seul le modèle *RSM* permet de reproduire le bon gradient de vitesse (vitesse importante à proximité de la grille et faibles vitesses sur les parois extérieures). La différence relative entre les deux approches est de 3 % en comparant des variables globales (vitesse moyenne, débit en circulation,...) et jusqu'à 22 % sur des variables locales de vitesse.

Au vu des résultats obtenus, nous pouvons considérer l'approche multi-échelle comme étant tout à fait pertinente pour reproduire les phénomènes physiques que l'on souhaite observer à deux échelles différentes.

La dernière partie de ce chapitre a permis d'utiliser les deux modèles pour effectuer le suivi de particules. L'utilisation d'une approche lagrangienne de suivi de particules au sein du modèle local a permis d'étudier la trajectoire des particules en fonction des caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement. L'analyse des trajectoires, en faisant varier les propriétés des particules (diamètre et masse volumique), a montré que l'efficacité de séparation dépend à la fois de la nature des particules mais également des phénomènes physiques générés par la grille. Pour résumer, les particules lourdes possèdent une inertie importante qui ne leur permet pas de contourner le métal déployé pour traverser la grille et les obligent ainsi à tourner tangentiellement contre la grille. A l'échelle de l'ouvrage, l'utilisation d'un modèle conceptuel de grille ne permet pas d'analyser l'efficacité réelle de l'ouvrage. De ce fait, la technique adoptée pour analyser le transport solide dans le pilote a été d'observer les processus de sédimentation et de quantifier les temps de séjour moyens avant le passage des particules par la grille. Cette technique a permis de classer les particules susceptibles de traverser la grille et celles qui vont sédimenter.



# PARTIE 5

## UTILISATION DES MODELES POUR OPTIMISER LE FONCTIONNEMENT DES OUVRAGES

---

<b>Introduction de la partie 5 .....</b>	<b>194</b>
<b>I. Optimisation à l'échelle globale.....</b>	<b>195</b>
1. Comportement hydraulique avec les aménagements .....	195
2. Influence des aménagements sur le transport solide .....	201
<b>II. Optimisation à l'échelle locale .....</b>	<b>204</b>
1. Influence du type de grille .....	204
3.1 Comportement hydrodynamique.....	204
2. Influence de l'inclinaison des bandelettes de métal .....	211
2.1 Conséquences sur les phénomènes physiques.....	211
2.1 Conséquences sur les pertes de charge.....	213
3. Transport solide.....	214
3.1 Analyse qualitative des trajectoires entre une plaque perforée et une grille à métal déployé....	214
3.2 Analyse quantitative sur la capacité des grilles à retenir des particules.....	217
<b>Conclusion de la partie 5 .....</b>	<b>220</b>

## INTRODUCTION DE LA PARTIE 5

L'objectif de ce chapitre consiste à appliquer les modèles numériques validés dans la partie précédente pour tenter d'optimiser le fonctionnement de l'ouvrage. Pour améliorer le fonctionnement de l'ouvrage, plusieurs approches sont possibles.

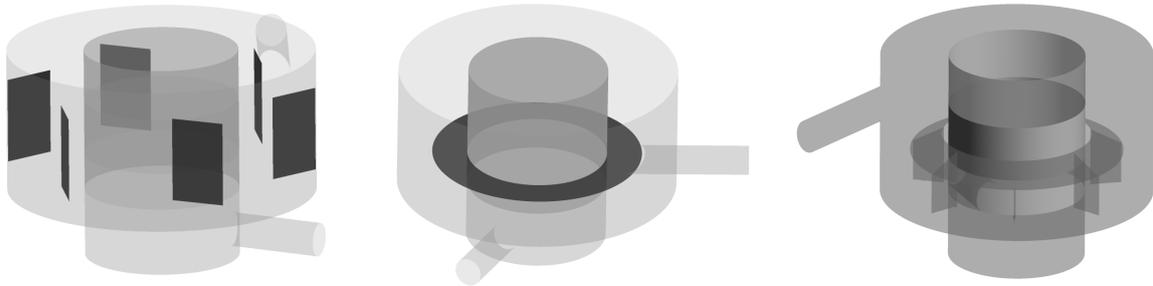
Les chapitres précédents ont montré que globalement, les vitesses les plus importantes se situaient à proximité de la grille. Ces vitesses tangentielles ont donc l'avantage de "nettoyer" la grille de manière permanente en faisant tourner la masse de déchets. Ainsi, un travail d'optimisation pour tenter d'accroître ces vitesses est envisagé dans une première partie.

La grille joue également un rôle important dans l'efficacité de l'ouvrage. Les phénomènes physiques provoqués par la forme de la grille peuvent modifier l'efficacité à l'échelle globale. Ainsi, on se propose dans une deuxième partie d'optimiser la forme de la grille en essayant d'accentuer les phénomènes physiques comme les effets de pression ou l'énergie cinétique turbulente permettant de disperser les polluants à proximité de la grille.

## I. OPTIMISATION A L'ECHELLE GLOBALE

La validation du modèle global (à l'échelle de l'ouvrage) permet d'utiliser l'approche numérique pour optimiser l'ouvrage. Notre étude consiste désormais à tester différentes configurations ou aménagements dans le but d'augmenter l'efficacité de l'ouvrage. Cette efficacité passe préalablement par une modification du comportement hydraulique. En partant du principe qu'il faut un maximum de vitesse à proximité de la grille, nous avons étudié trois cas d'aménagements possibles (*Figure 176*) :

- l'installation de déflecteurs verticaux sur les parois extérieures dans l'objectif d'augmenter le champ de vitesse à proximité de la grille pour éviter le colmatage
- l'installation d'une plaque horizontale juste au-dessus de la grille dans l'objectif de diminuer les vitesses sous la grille et éviter la remise en suspension des polluants
- l'installation d'une paroi conique avec des déflecteurs verticaux dans l'objectif de favoriser la sédimentation (via l'inclinaison de la plaque) et casser l'écoulement dans la zone de stockage (sous la grille)



*Figure 176. Aménagements testés à l'aide du modèle global*

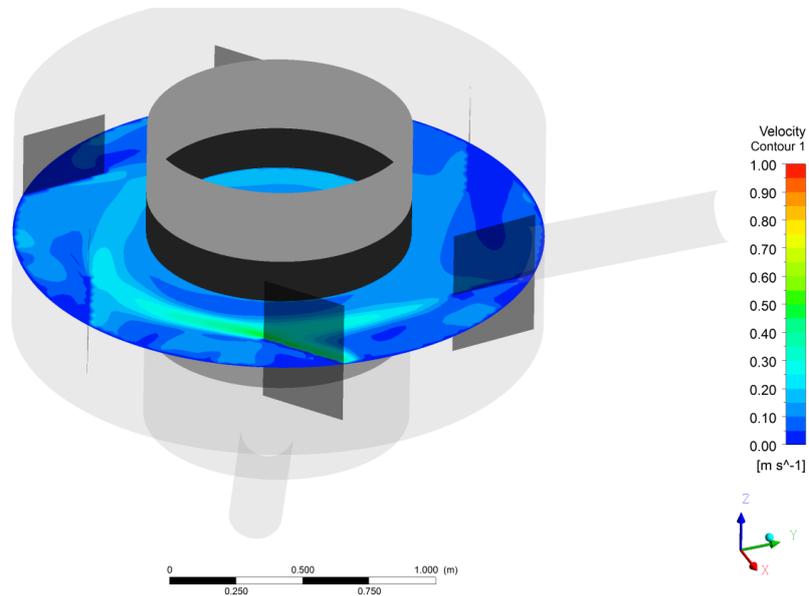
Dans cette partie, nous avons choisi d'utiliser la géométrie du pilote pour ce travail d'optimisation pour deux raisons. La validation du modèle global est basée sur des comparaisons avec la géométrie brute du pilote. La seconde raison concerne les perspectives et les tests expérimentaux qui pourront être réalisés, par la suite, sur le pilote du laboratoire.

### 1. COMPORTEMENT HYDRAULIQUE AVEC LES AMENAGEMENTS

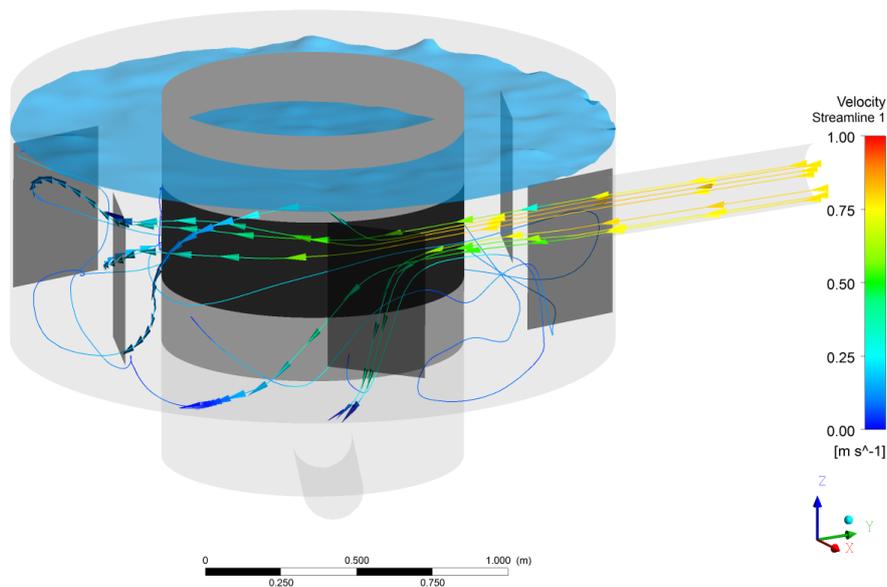
#### Comportement en présence de déflecteurs verticaux

L'installation de six déflecteurs, équirépartis le long des parois extérieures et orientés avec un angle de 30°, se justifie dans le but d'augmenter le champ de vitesse à proximité de la grille. Bien que l'installation de déflecteurs oriente le flux vers la grille, les résultats ne sont pas encourageants (*Figure*

177). En effet, les champs de vitesse sont très faibles. La vitesse moyenne proche de la grille est de 0,12 m/s, soit 7 fois plus faible qu'en configuration brute. D'autre part, le ratio débit en circulation/débit injecté est inférieur à 2 (contre 10 sans les aménagements). Ces résultats montrent donc que les déflecteurs favorisent le passage du fluide à travers la grille. En considérant que les polluants sont pilotés par l'écoulement, on peut ainsi faire l'hypothèse que les polluants seront directement dirigés vers la grille et les faibles vitesses à proximité de la partie centrale favoriseront leur stagnation.



**Figure 177. Champ de vitesse horizontal à  $z = 0,38$  m en présence de déflecteurs pour un débit de 25 l/s**

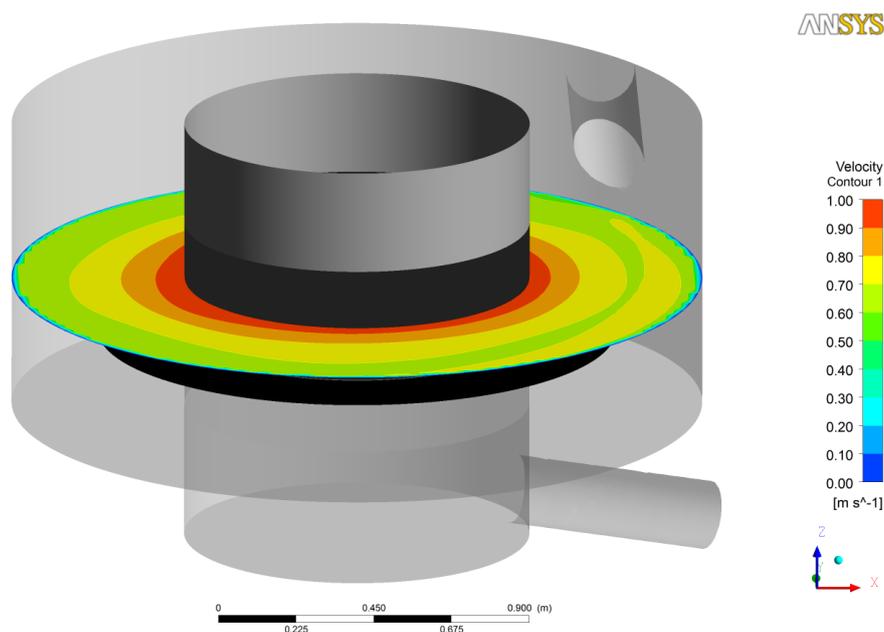


**Figure 178. Lignes de courants et allure de la surface libre en présence de déflecteurs pour un débit de 25 l/s**

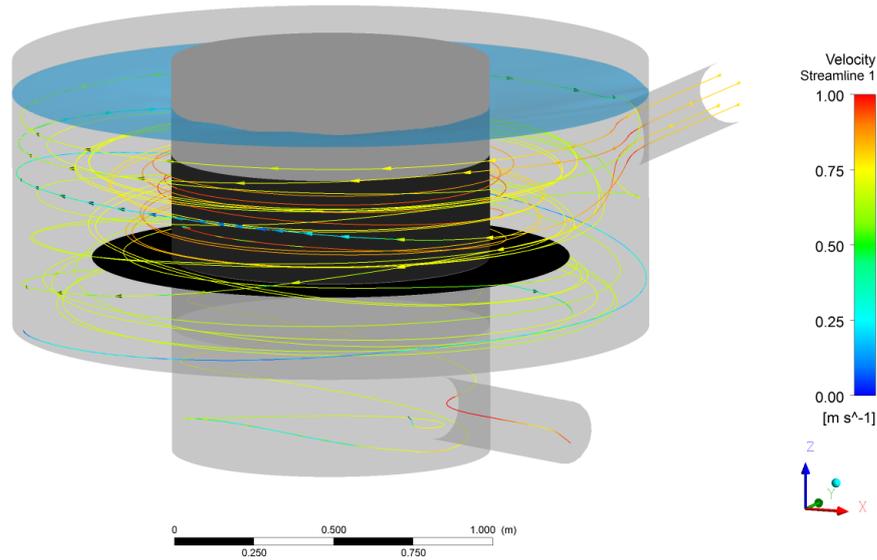
Le seul avantage de cette configuration concerne l'observation de phénomènes de recirculations (*Figure 178*) et de zones mortes à l'arrière des déflecteurs (*Figure 177*). Ces phénomènes sont intéressants dans le cadre de l'exploitation de l'ouvrage puisque les zones mortes sont généralement sujettes à des dépôts importants. En conclusion, si l'installation des déflecteurs verticaux est à proscrire pour augmenter les vitesses, l'utilisation de déflecteurs peut être étudiée dans un autre but, comme par exemple en travaillant sur les zones de stockages, qui sont bien souvent problématiques pour l'exploitation.

### Comportement en présence d'une plaque horizontale sous la grille

Dans un autre objectif, l'installation d'une plaque horizontale a été testée pour diminuer les vitesses dans la zone de stockage (sous la grille) et ainsi éviter tout phénomène de remise en suspension des polluants. L'ajout de cette plaque permet d'obtenir des résultats plutôt prometteurs (*Figure 179*). Les champs de vitesse à proximité de la grille ainsi que le ratio des débits sont très proches de ceux obtenus avec la configuration brute (respectivement 0,86 m/s et 9). Contrairement à la configuration avec des déflecteurs, la plaque ne crée pas de recirculations (*Figure 180*). L'avantage de cette configuration est qu'elle permet de diminuer les vitesses dans la partie inférieure de l'ouvrage. Sous la grille (à  $z = 0,11$  m et  $R = 0,59$  m), la vitesse moyenne est de 0,31 m/s soit presque trois fois moins qu'en configuration brute (0,86 m/s). Par conséquent, cette configuration peut être retenue et répond à aux objectifs fixés.



*Figure 179. Champ de vitesse horizontal à  $z = 0,38$  m en présence d'une plaque horizontale pour un débit de 25 l/s*



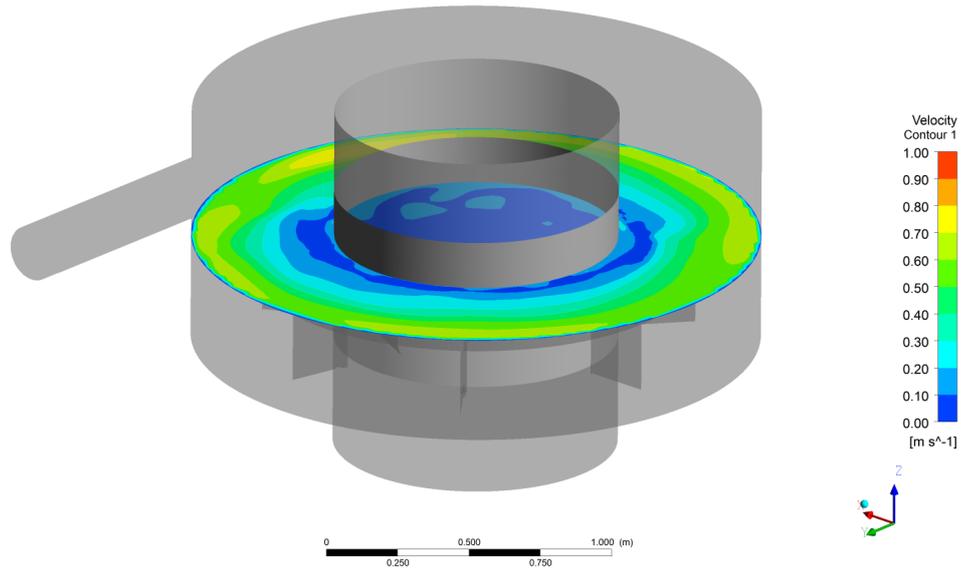
**Figure 180. Lignes de courants et allure de la surface libre en présence d'une plaque horizontale pour un débit de 25 l/s**

### **Comportement en présence d'une paroi conique sous la grille**

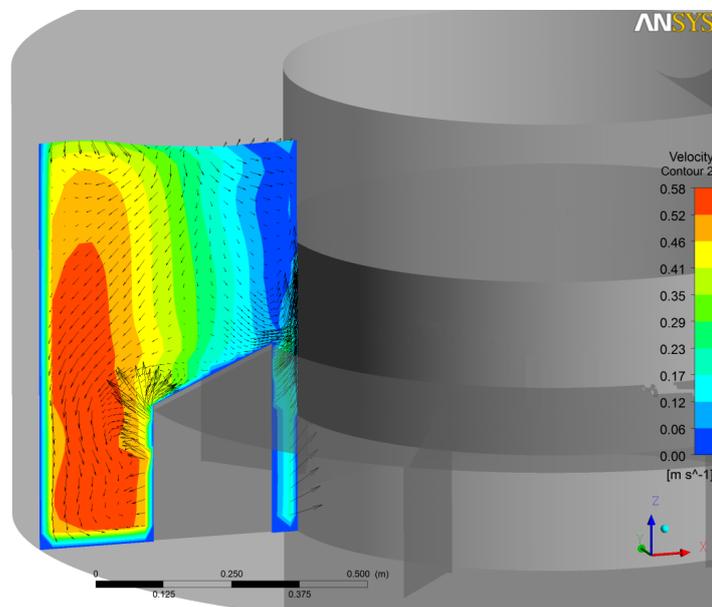
Une troisième configuration a été testée. En partant des résultats obtenus sur une plaque verticale, nous avons choisi d'incliner la paroi de manière à faciliter la décantation. D'autre part, des déflecteurs sont placés sous la paroi pour casser l'écoulement en rotation dans la partie basse de l'ouvrage. Cette configuration a donc pour objectif de limiter encore plus les phénomènes de remise en suspension.

Le champ de vitesse illustré sur la *Figure 181* et la *Figure 182* montre un comportement hydraulique différent à celui obtenu pour une configuration brute ou une configuration en présence d'une plaque verticale. A proximité de la grille, les vitesses sont les plus faibles (environ 0,16 m/s en moyenne) alors que le gradient de fortes vitesses se situe au niveau des parois extérieures (0,6 m/s). Ce phénomène peut s'expliquer par l'influence du cône et des déflecteurs sur l'écoulement. Il est possible de voir à partir de la *Figure 183* l'influence des déflecteurs verticaux. Par leur présence, ils cassent la circulation proche de la grille et provoquent la contraction de l'écoulement contre les parois extérieures. Par rapport aux objectifs fixés, ces résultats ne sont pas encourageants car des gradients de vitesse tel qu'observés dans cette nouvelle configuration vont favoriser l'immobilisation des déchets à proximité de la grille.

Concernant la partie basse de l'ouvrage, il est possible d'observer des recirculations verticales entre les déflecteurs. Ces recirculations impliquent que les polluants vont être piégés dans ces zones mortes avant d'être très certainement réentraînés dans l'écoulement principal (*Figure 183*).



*Figure 181. Champ de vitesse horizontale à  $z = 0,38$  m en présence d'une paroi conique avec déflecteurs pour un débit de 25 l/s*



*Figure 182. Champ de vitesse verticale à  $\theta = 180^\circ$  en présence d'une paroi conique avec déflecteurs pour un débit de 25 l/s*

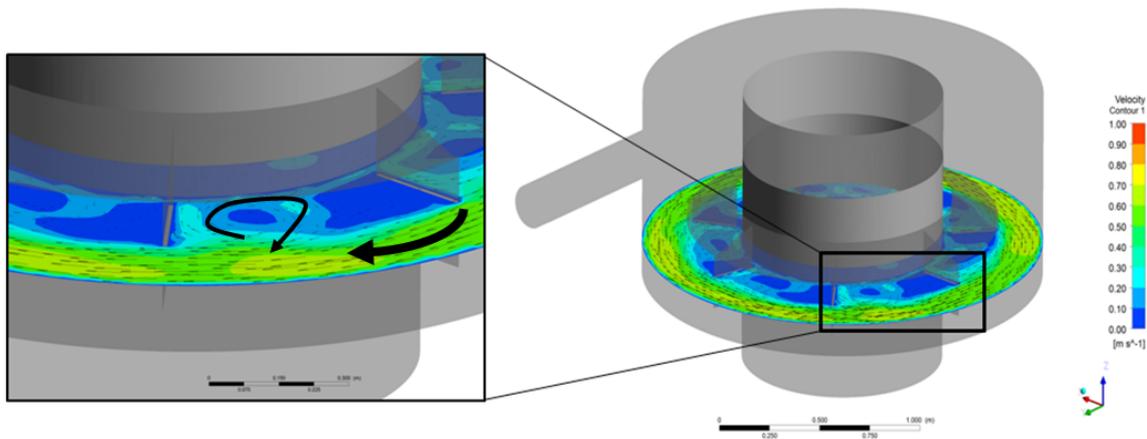


Figure 183. Champ de vitesse horizontal à  $z = 0,11$  m en présence d'une paroi conique avec déflecteurs pour un débit de 25 l/s

### Bilan

Les résultats obtenus pour les différents cas testés sont très diversifiés d'un point de vue hydraulique. Le *Tableau 26* démontre à quel point les aménagements peuvent influencer les comportements locaux et globaux. Par rapport aux objectifs recherchés, à savoir augmenter les vitesses à proximité de la grille et diminuer les vitesses dans la zone de stockage, l'aménagement le plus intéressant est la plaque horizontale. Si elle ne permet pas d'augmenter les vitesses par rapport à une configuration brute, elle permet cependant de diviser par 3 les champs de vitesses dans la zone de stockage.

Les autres configurations ne sont pas à abandonner pour autant. Elles ne répondent pas à nos objectifs mais les observations que l'on a pu faire peuvent être réutilisées dans d'autre cas de figure. Citons par exemple l'utilisation des déflecteurs pour créer des zones de stockage ou encore l'inclinaison de la plaque horizontale pour favoriser la décantation de polluants pouvant se retrouver sur la plaque. Par la suite, d'autres configurations pourront être testées, mais une attention particulière devra être faite sur les contraintes techniques liées à l'exploitation et à la maintenance d'un tel ouvrage (passage d'une échelle, d'une personne,...).

	Géométrie brute	6 déflecteurs verticaux	Plaque horizontale	Paroi conique avec déflecteurs
<b>Vitesse proche de la grille (m/s)</b>	0,89	0,12	0,86	0,16
<b>Vitesse sous la grille (m/s)</b>	0,86	0,13	0,31	0,06
<b>Ratio <math>Q_c/Q_e</math></b>	10,0	1,4	9,0	3,9

Tableau 26. Comparaison des variables locales et globales obtenues pour les différents aménagements testés

## 2. INFLUENCE DES AMÉNAGEMENTS SUR LE TRANSPORT SOLIDE

L'utilisation de l'approche euléro-lagrangienne a été employée pour suivre la trajectoire des particules dans le pilote pour différents aménagements. Nous avons uniquement représenté des particules d'un diamètre (200  $\mu\text{m}$ ) et de deux masses volumiques (1040 et 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$ ), l'objectif étant de visualiser l'influence de ces aménagements sur le transport solide. D'autre part, la géométrie de la grille étant remplacée par une approche conceptuelle, il est nécessaire de tempérer les résultats suivants. Nous avons illustré sur les figures suivantes la trajectoire des particules en fonction du temps de rétention dans l'ouvrage (temps de séjour avant le passage par la grille). Le temps de rétention des particules est donc utilisé comme indicateur et pour comparer les différents aménagements.

En présence de déflecteurs, nous avons remarqué que le ratio des débits était très faible. Cela a pour effet de favoriser le passage de l'écoulement à travers la grille et de réduire le champ de vitesse. Concernant le transport solide, les particules de faible masse volumique passent très rapidement à travers la grille (en moyenne 73 s après leur injection dans l'ouvrage). Ce temps de séjour est légèrement supérieur au temps moyen calculé pour une configuration brute (57 s). Cette différence s'explique certainement par les particules piégées dans les zones mortes (*Figure 184*). Les particules de masse volumique de 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$  sont quant à elles piégées au fond par les phénomènes de recirculation. On peut observer la présence d'une zone située au niveau du fond entre deux déflecteurs positionnés sous la conduite d'entrée du pilote. Cette zone morte permet de piéger la plupart des particules lourdes. De plus, cette configuration permet de capturer 60 % des particules de diamètre 200  $\mu\text{m}$  et 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$  et seulement 40 % ont traversé la grille au bout de 523 secondes.

L'installation d'une plaque horizontale ne modifie quasiment pas l'efficacité de rétention des particules de faible masse volumique (64 s contre 57 s pour une configuration brute). Pour des particules plus lourdes, on constate que les particules plongent puis sédimentent au fond autour de la paroi centrale (*Figure 185*). On peut donc mettre en avant que cette configuration permet de réduire le champ de vitesse sous la grille et par conséquent de favoriser la chute des particules. La simulation a permis de déterminer que 60 % des particules de 200  $\mu\text{m}$  et 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$  traversaient la grille en moyenne après 439 secondes.

La dernière configuration, que l'on a défini comme peu intéressante d'un point de vue hydraulique, montre clairement l'influence des champs de vitesse sur le transport solide. Les particules de faible masse volumique sont directement entraînées vers la grille. En revanche, les particules plus lourdes sont portées vers les parois extérieures avant de décanter et de se diriger vers le fond (*Figure 186*). Certaines particules ressortent des recirculations présentes dans le fond et retrouvent l'écoulement principal, d'autres remontent par le petit espace prévu (entre la grille et le cône) pour laisser décanter certains déchets qui obstrueraient la grille. Concernant les temps de séjour, la paroi conique est moins

efficace pour capturer des particules de faibles masses volumiques. Les temps de séjours sont plus faibles que pour la configuration brute (45 s pour la paroi conique contre 57 pour la configuration brute). D'autre part, la paroi conique permet de retenir 10 % des particules de 2500 kg/m<sup>3</sup>.

	Configuration brute		Avec 6 déflecteurs		Avec plaque horizontale		Avec paroi conique	
	1040 kg/m <sup>3</sup>	2500 kg/m <sup>3</sup>	1040 kg/m <sup>3</sup>	2500 kg/m <sup>3</sup>	1040 kg/m <sup>3</sup>	2500 kg/m <sup>3</sup>	1040 kg/m <sup>3</sup>	2500 kg/m <sup>3</sup>
Temps de séjour avant passage par la grille	57 s	31 s	73 s	523 s pour 40 % des particules (60% des particules piégées)	64 s	439 s pour 60 % des particules (40% des particules piégées)	45 s	800 s pour 90 % des particules (10% des particules piégées)

Tableau 27. Comparaison des temps de séjours moyens des particules avant le passage par la grille pour les différents aménagements testés à un débit de 25 l/s

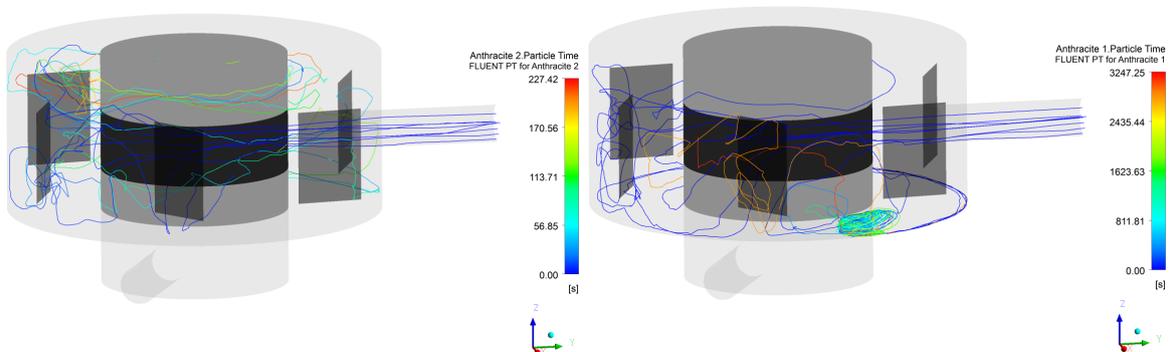


Figure 184. Trajectoires de particules de diamètre 200 µm et de masse volumique 1040 kg/m<sup>3</sup> (à gauche) et 2500 kg/m<sup>3</sup> (à droite) pour un débit de 25 l/s en présence de 6 déflecteurs verticaux

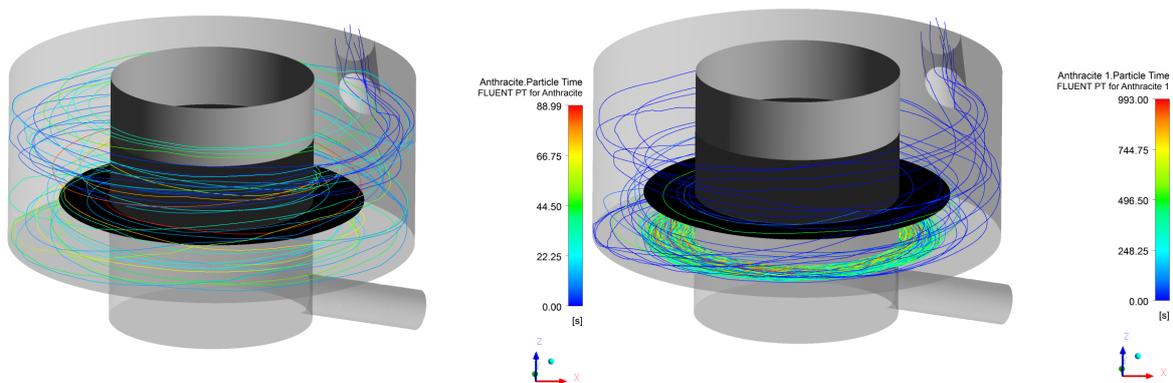
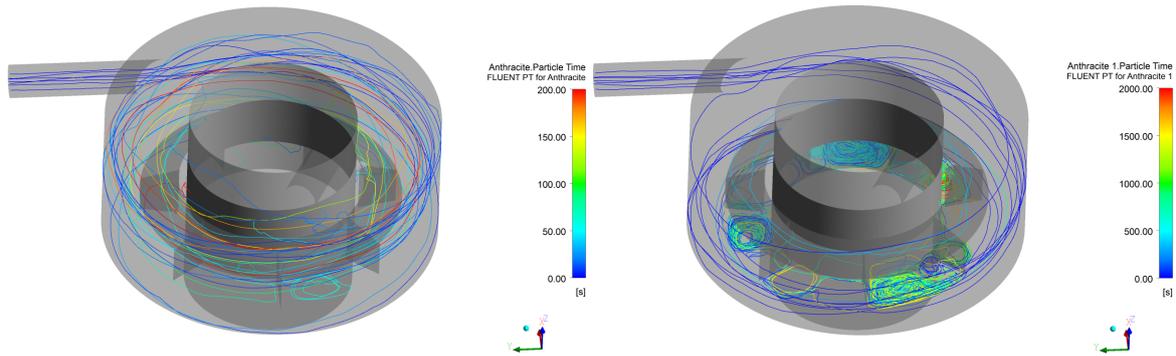


Figure 185. Trajectoires de particules de diamètre 200 µm et de masse volumique 1040 kg/m<sup>3</sup> (à gauche) et 2500 kg/m<sup>3</sup> (à droite) pour un débit de 25 l/s en présence de la plaque horizontale



**Figure 186.** Trajectoires de particules de diamètre  $200\ \mu\text{m}$  et de masse volumique  $1040\ \text{kg/m}^3$  (à gauche) et  $2500\ \text{kg/m}^3$  (à droite) pour un débit de  $25\ \text{l/s}$  en présence de la paroi conique

## Bilan

En testant différents aménagements dans le modèle global, nous avons pu remarquer qu'il était possible d'augmenter le temps de séjour des particules. Même si le travail d'optimisation peut être encore plus poussé, la configuration avec la plaque horizontale semble être la plus aboutie. Elle répond aux critères permettant de limiter le colmatage (vitesse tangentielle importante près de la grille), limiter les phénomènes de remise en suspension (faible vitesse dans le fond) et permet aussi d'augmenter la rétention de particules fines. Concernant les deux autres cas, les déflecteurs peuvent être réétudiés dans un autre contexte, comme par exemple la création d'une zone de stockage. Dans notre objectif, les vitesses à proximité de la grille sont beaucoup trop faibles. Il en va de même pour la configuration avec la paroi conique, où les conditions de vitesses à proximité de la grille sont propices au colmatage.

## II. OPTIMISATION A L'ECHELLE LOCALE

Le but de cette partie consiste à utiliser le modèle déterministe de la grille pour tenter d'augmenter l'efficacité de la grille. Cette efficacité étant notamment jugée sur les phénomènes éventuels de colmatage et de rétention de particules, nous chercherons à augmenter les phénomènes physiques tel que les forces de pression ou encore les phénomènes de turbulence à l'amont de la grille.

Par ailleurs, le fait de tester différentes configurations devrait nous permettre de déterminer les paramètres les plus sensibles à l'augmentation de ces effets. Les différentes configurations testées sont citées dans le *Tableau 28*. A travers la comparaison des différentes géométries, nous devrions être capables d'observer l'influence entre la plaque perforée et une grille de type métal déployé sur le comportement hydrodynamique (par exemple en comparant la géométrie 1 avec la géométrie 2). Nous devrions également montrer l'influence de la taille des orifices. La comparaison entre les configurations 4 et 5 permettra quant à elle d'étudier l'influence de l'angle d'inclinaison du métal.

	<b>Dénomination de la grille / Type</b>	<b>Tailles orifices</b>	<b>Porosité (de face)</b>	<b>Inclinaison</b>
1	Plaque perforée trous oblong	20 mm x 5 mm	0,44	0
2	Métal déployé "grandes mailles"	27 mm x 5,1 mm	0,48	45°
3	Plaque perforée trous hexagonaux	17 mm x 1,65 mm	0,22	0
4	Métal déployé "petites mailles" - 30°	17 mm x 1,65 mm	0,24	30°
5	Métal déployé "petites mailles" - 45°	17 mm x 1,65 mm	Non définie	45°
6	Métal déployé "petites mailles" - 60°	17 mm x 1,65 mm	Non définie	60°

*Tableau 28. Différentes géométries testées pour l'optimisation de la grille*

### 1. INFLUENCE DU TYPE DE GRILLE

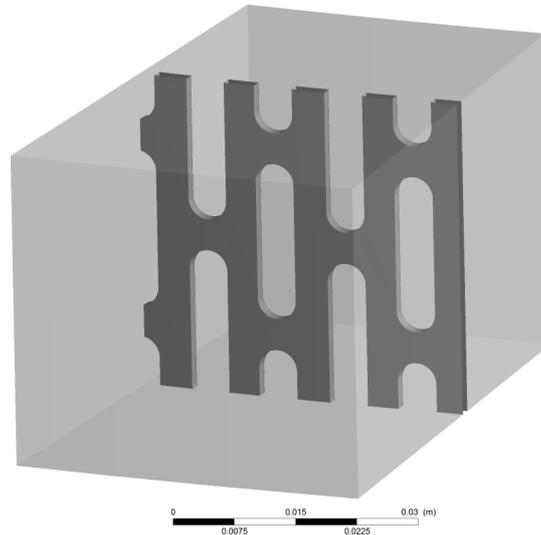
#### 3.1 Comportement hydrodynamique

L'étude bibliographique ainsi que les résultats préalables ont démontré le rôle prépondérant de la forme de la grille sur l'écoulement et les différents phénomènes physiques associés. Dans ce contexte le modèle local est appliqué pour tester et comparer différentes formes de grilles. L'intérêt de cette partie est de montrer l'influence de l'utilisation d'une grille de type métal déployé par rapport à des plaques perforées usuellement utilisées dans les ouvrages.

### Influence d'une grille de type plaque perforée

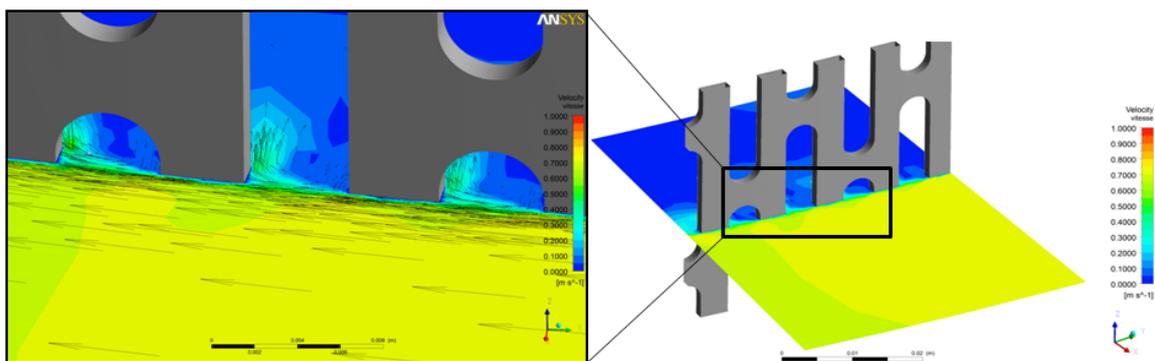
Un premier modèle a été construit à partir de la géométrie de la grille perforée utilisée lors des campagnes expérimentales. Cette grille illustrée sur la *Figure 187* est caractérisée par une épaisseur de 1 mm et par des trous oblongs (voir *Tableau 28*).

Les paramètres de simulations utilisés pour simuler l'écoulement dans le modèle sont identiques à ceux utilisés dans la *Partie 3* pour un débit équivalent à 25 l/s.



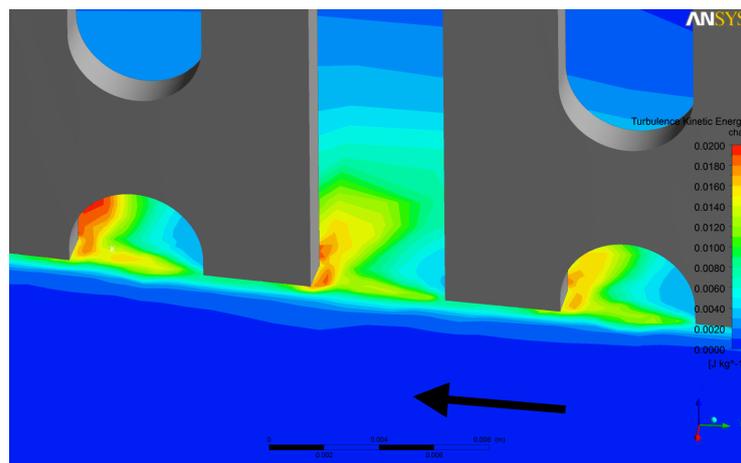
*Figure 187. Géométrie du modèle local de la plaque perforée*

Les résultats obtenus via la modélisation ont montré de nombreux points communs avec l'expérimental. Premièrement, l'utilisation de ce type de forme ne permet pas de modifier le sens de circulation dans la partie centrale (*Figure 188*). Si l'écoulement est dans le sens horaire à l'extérieur de la grille, il sera également dans le sens horaire dans la partie centrale.

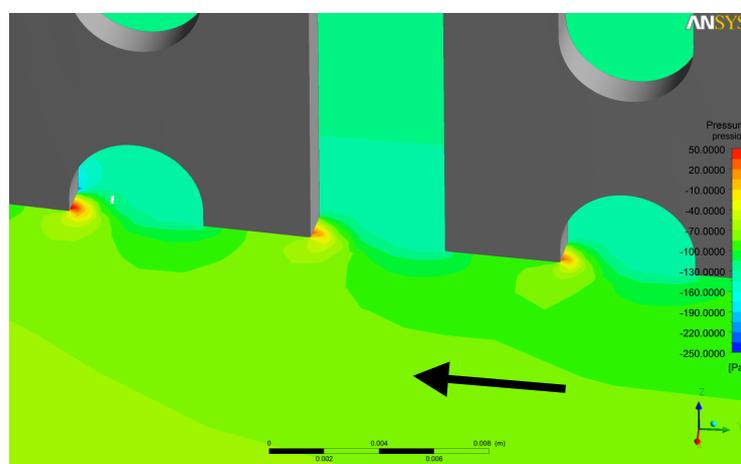


*Figure 188. Champ de vitesse à proximité de la plaque perforée*

Un point important concerne les phénomènes de turbulence. Contrairement à l'approche expérimentale où l'on mesure la turbulence de manière ponctuelle, la simulation permet d'obtenir un aperçu précis du champ d'énergie cinétique turbulente. La confrontation des deux approches montre l'augmentation de l'énergie cinétique turbulente à l'aval de la grille (*Figure 189*). L'hypothèse la plus probable concernant la présence de turbulence à l'arrière de la grille est la taille des ouvertures. En effet, comme décrit dans l'étude bibliographique, plus l'ouverture des orifices est grande, plus la grille aura tendance à générer de la turbulence à l'aval. Etant donné, que les phénomènes que l'on souhaite augmenter doivent se situer à l'amont de la grille pour favoriser l'éjection des polluants, nous pouvons juger cette forme de grille comme moins performante par rapport aux résultats observés sur la grille de type métal déployé étudié dans la *Partie 3*.



*Figure 189. Champ d'énergie cinétique turbulente à proximité de la plaque perforée*

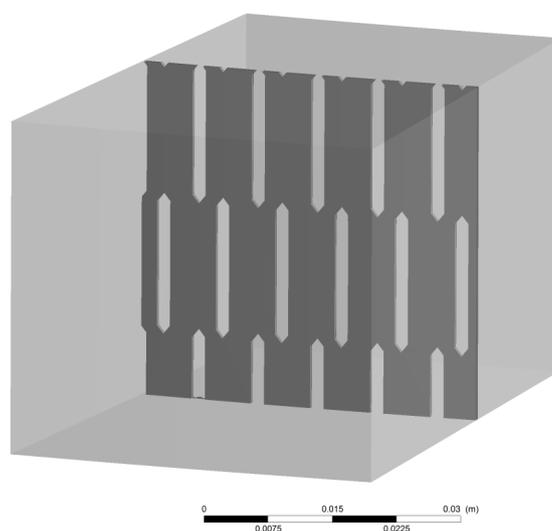


*Figure 190. Champ de pression à proximité de la plaque perforée*

D'autre part, les effets de pression sont moins marqués avec ce type de grille (*Figure 190*). Nous avons souligné l'importance des différences de pression au niveau des orifices, en particulier dans le contexte du colmatage. Pour la grille testée, la différence de pression relevée est inférieure à 50 Pa alors que pour une grille de type métal déployé "petites mailles" cette différence est de 150 Pa. La différence entre les deux grilles peut donc laisser présager le fait qu'une plaque perforée sera plus sensible au colmatage.

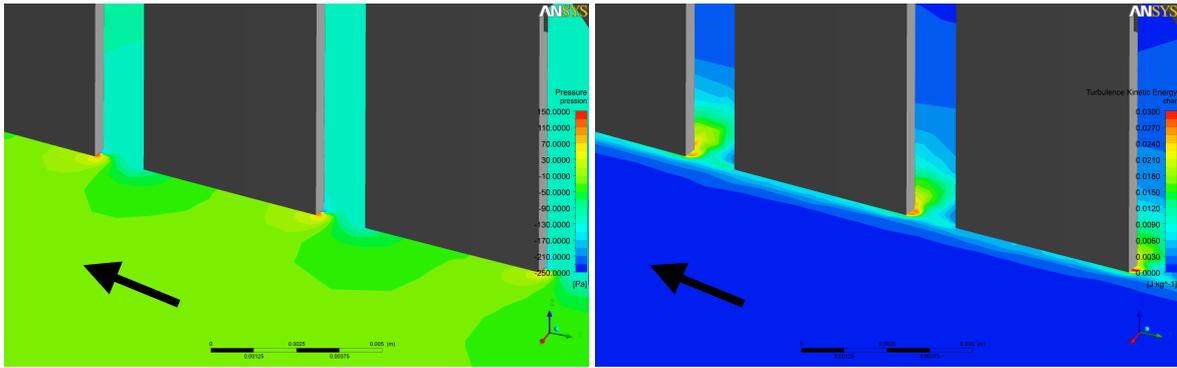
### **Influence de la taille des orifices**

Au delà de la forme, l'influence de la taille des orifices peut également remettre en cause la présence ou non des phénomènes que l'on cherche à mettre en avant. Pour vérifier si l'influence de la taille des orifices est réelle, nous avons construit un second modèle de plaque perforée avec des trous hexagonaux, identique à la grille "petites mailles" de type métal déployé. La géométrie de la grille est illustrée sur la *Figure 191*.



*Figure 191. Géométrie de la plaque perforée avec des trous hexagonaux*

Pour des conditions hydrauliques similaires, les phénomènes hydrodynamiques observés sont plus proches de ceux observés sur la plaque perforée avec des trous oblongs que sur la grille de type métal déployé "petites mailles". Les valeurs des différentes variables sont très proches pour les deux plaques : la différence de pression entre les deux zones extrêmes est d'environ 50 Pa et le taux d'énergie cinétique turbulente avoisine les  $0,02 \text{ m}^2/\text{s}^2$  à l'arrière de la plaque (*Figure 192*). En conclusion, on peut dire que les phénomènes hydrodynamiques sont identiques pour une plaque perforée, et ceci quelque soit la taille des orifices.

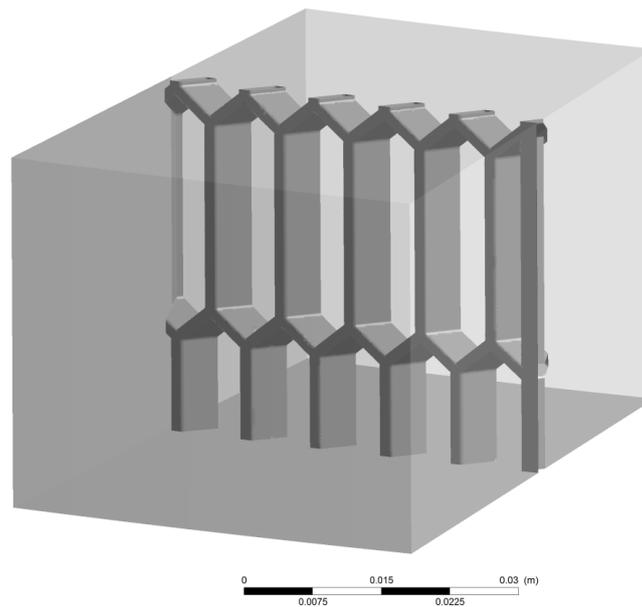


**Figure 192. Champs de pression (à gauche) et d'énergie cinétique turbulente (à droite) pour une plaque perforée avec des trous hexagonaux**

### **Grille de type métal déployé "grandes mailles"**

Dans la continuité du paragraphe ci-dessus, l'influence de la taille des orifices pour une grille de type métal déployé peut être analysée en comparant la grille "petites mailles" avec la grille "grandes mailles".

Le modèle de la grille "grandes mailles" est construit sur la base des modèles précédents en utilisant les caractéristiques de la grille utilisée lors des expériences (*Tableau 28*).

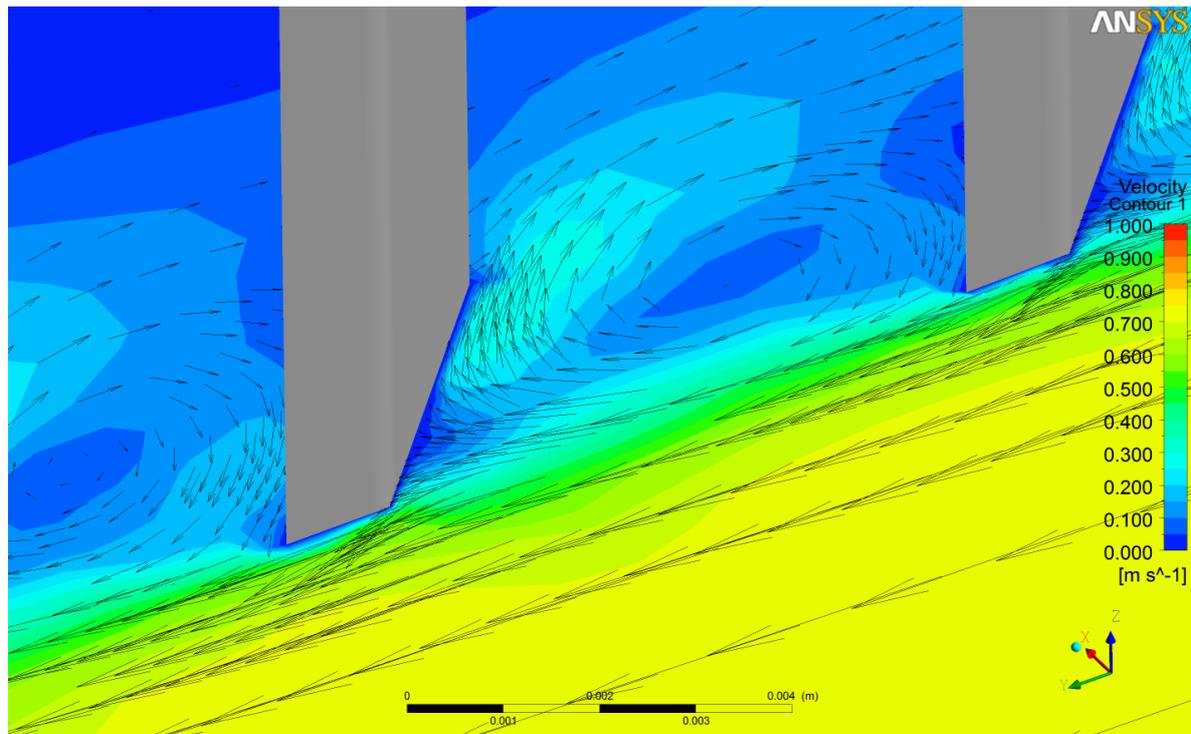


**Figure 193. Géométrie de la grille de type métal déployé GM**

L'écoulement est très proche de celui observé avec des petites mailles. L'inclinaison du métal permet d'obtenir un écoulement inverse dans la partie centrale. Il est aussi possible de visualiser la présence des recirculations dans l'entrefer (*Figure 194*). Le comportement des forces de pression est également

analogue. Les différences de pression sont toutefois plus faibles que pour des petites mailles, mais beaucoup plus marquées qu'en utilisant une plaque perforée. Ainsi, pour un angle d'inclinaison de  $45^\circ$  et des grandes ouvertures, la valeur de la différence de pression est d'environ 100 Pa (à gauche dans la *Figure 195*). L'observation du champ d'énergie cinétique turbulente montre une zone fortement turbulente à l'extrémité des bandelettes de métal avec un taux d'énergie cinétique turbulente maximum d'environ  $0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Contrairement à la simulation réalisée avec les petites mailles, les phénomènes turbulents sont encore présents à l'arrière de la grille avec des grandes mailles (à droite dans la *Figure 195*).

En comparant les deux grilles de types métal déployé, on peut observer des phénomènes hydrodynamiques similaires. La taille des orifices influera cependant sur la valeur des grandeurs physiques. Le fait de diminuer la taille permet d'augmenter les différents effets souhaités. Gardons cependant à l'esprit que diminuer la taille des orifices augmente les pertes de charge. Ce critère de taille d'orifice devient ainsi un sujet de discussion intéressant puisqu'il est à prendre en compte lors du dimensionnement de l'ouvrage. Dans les critères de dimensionnement, un compromis doit être fait entre les pertes de charge admissibles et les phénomènes physiques à proximité de la grille que l'on cherche à obtenir.



*Figure 194. Champ de vitesse pour la grille GM*

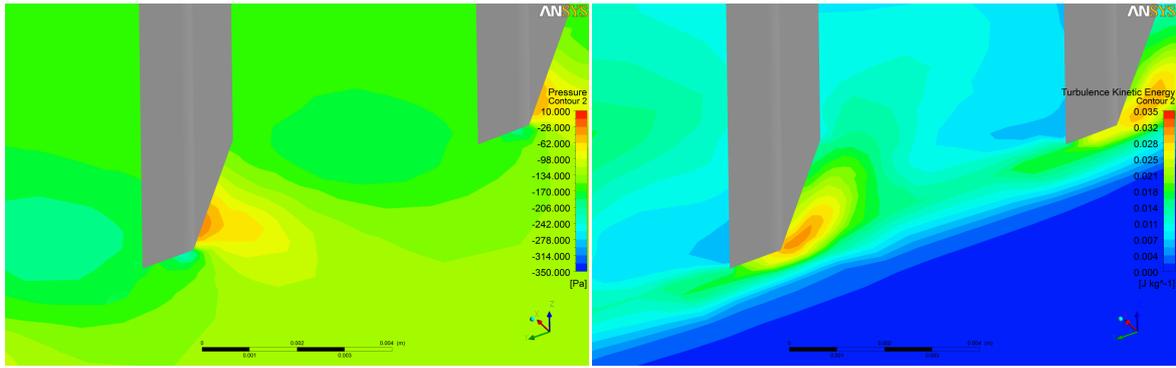


Figure 195. Champs de pression (à gauche) et d'énergie cinétique turbulente (à droite) pour la grille GM

### Bilan

Pour résumer, en injectant des conditions hydrauliques similaires, le modèle local permet de tester différentes formes de grilles. Le bilan effectué à partir de plusieurs modèles montre l'influence des géométries sur les phénomènes physiques se produisant à proximité des ouvertures. Les résultats rapportés dans le *Tableau 29* montrent deux différences importantes. Une grille de type métal déployé génère de la turbulence à l'amont de la grille par le biais des bandelettes de métal. De plus, ces bandelettes permettent de créer des différences de pression importantes entre l'extrémité et le milieu de l'entrefer. Par conséquent, on peut considérer que les grilles de types métal déployé seront moins sensibles au colmatage. L'autre constat concerne la taille des orifices. Le fait de diminuer la taille des ouvertures permet d'accentuer la valeur des phénomènes physiques (pression et turbulence).

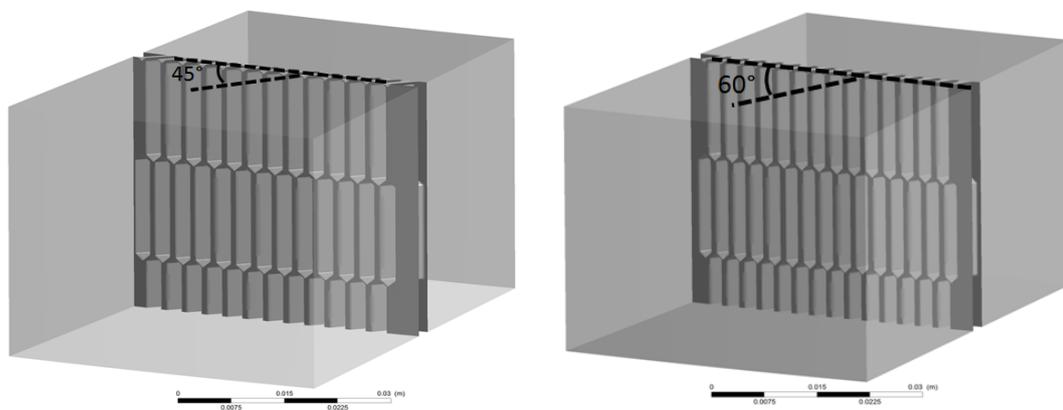
Type de grille	Différence de pression	Energie cinétique turbulente	Observations
Plaque perforée (trous oblongs)	50 Pa	max 0,02 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Pas de turbulence à l'amont de la grille
Plaque perforée (trous hexagonaux)	50 Pa	max 0,02 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Faibles gradients de pression
Métal déployé GM			
25 x 5,1 mm 45°	100 Pa	0,03 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	
Métal déployé PM			Turbulence à l'amont de la grille
17 x 1,75 mm 30°	150 Pa	0,035 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Gradients de pression important

Tableau 29. Synthèse des phénomènes observés pour différentes formes de grille avec le modèle local

## 2. INFLUENCE DE L'INCLINAISON DES BANDELETTES DE METAL

La synthèse bibliographique nous a permis d'identifier l'influence de l'angle d'inclinaison entre l'écoulement et la grille, en particulier sur les phénomènes de pertes de charge (Santiago, 2007) et les champs de vitesse (Chatellier, 2010). De ce fait, et en raison des résultats intéressants obtenus avec la grille de type métal déployé, nous avons choisi d'approfondir nos connaissances sur l'influence de l'inclinaison des bandelettes de métal. La grille "petites mailles" possède une inclinaison de  $30^\circ$ , soit un angle très fermé. Nous avons construit deux autres modèles avec une inclinaison plus importante (*Figure 196*) dans le but d'observer l'influence de l'augmentation de cet angle. L'augmentation de l'ouverture devrait permettre de réduire les pertes de charge. En contre partie, les phénomènes physiques que l'on souhaite accentuer risquent d'être modifiés.

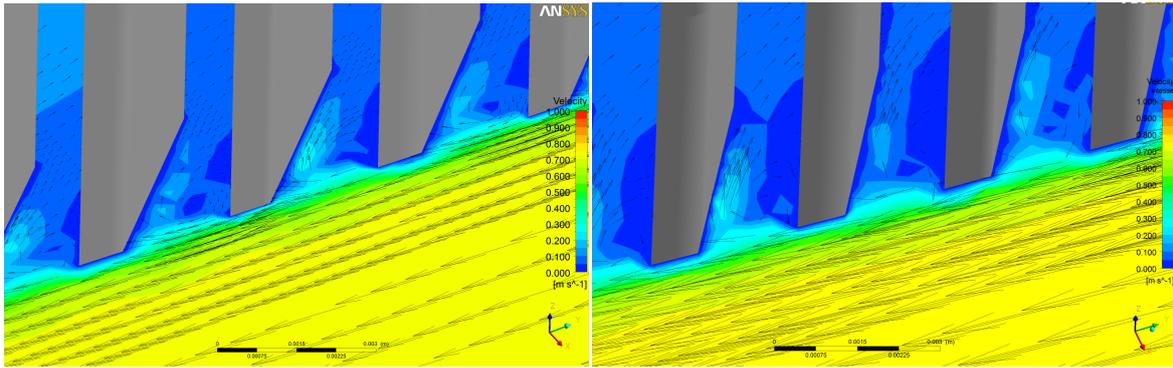
La construction des maillages a été réalisée en partant des mêmes paramètres que pour le modèle local avec un angle de  $30^\circ$  et défini dans la *Partie 3*. Les deux modèles sont ainsi composés d'environ 2 500 000 mailles.



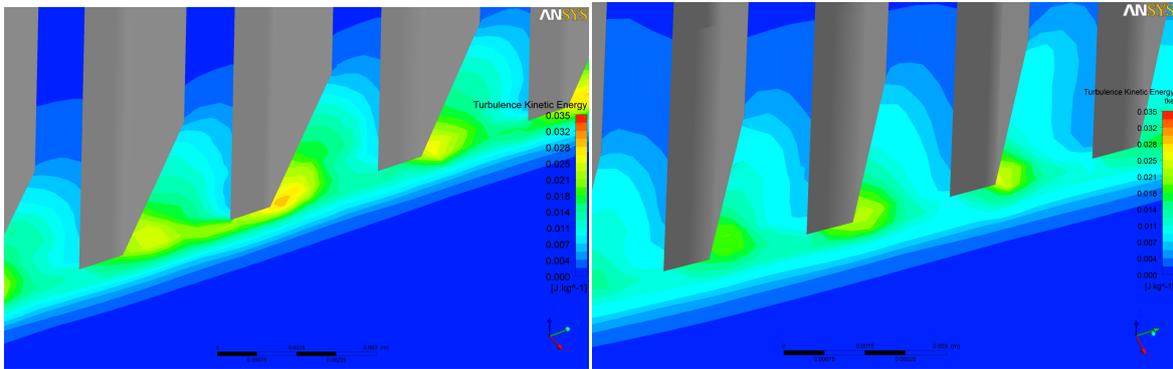
*Figure 196. Géométrie des portions de grilles avec un angle de  $45^\circ$  (à gauche) et  $60^\circ$  (à droite)*

### 2.1 Conséquences sur les phénomènes physiques

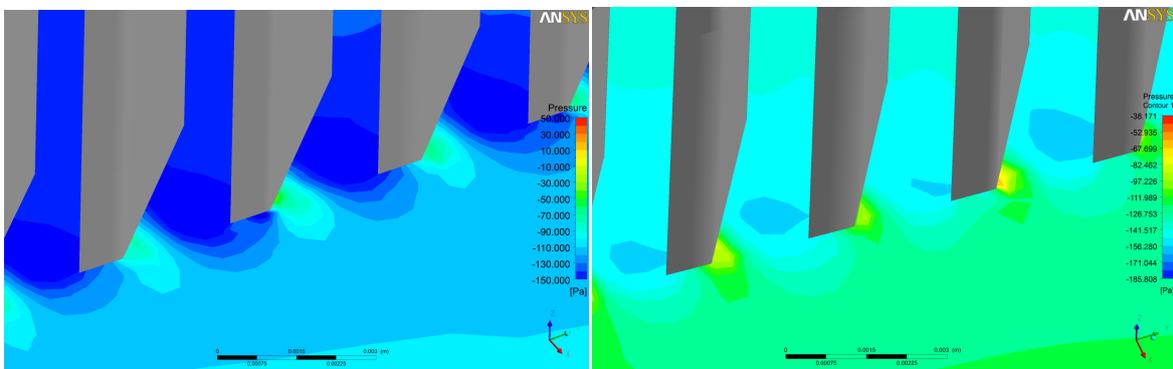
L'influence de l'inclinaison des bandelettes peut être jugée en partant de la même analyse que précédemment. En effet, on constate que l'inclinaison a un impact non négligeable sur les champs de pression et d'énergie cinétique turbulente. L'énergie cinétique turbulente augmente en diminuant l'ouverture. Pour  $45^\circ$ , le taux d'énergie cinétique turbulente est de  $0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , contre  $0,02 \text{ m}^2/\text{s}^2$  pour un angle de  $60^\circ$  (*Figure 198*). Il est également possible de constater l'influence de l'inclinaison sur les forces de pression. La *Figure 199* montre que pour un angle de  $45^\circ$ , la différence de pression entre la zone de forte pression et la zone de recirculation est d'environ 100 Pa. Pour une inclinaison de  $60^\circ$ , la différence de pression calculée est seulement de 60 Pa.



*Figure 197. Champs de vitesse à proximité de la grille avec un angle de 45° (à gauche) et 60° (à droite) pour un débit de 25 l/s*



*Figure 198. Champs d'énergie cinétique turbulente à proximité de la grille avec un angle de 45° (à gauche) et 60° (à droite) pour un débit de 25 l/s*



*Figure 199. Champs de pression à proximité de la grille avec un angle de 45° (à gauche) et 60° (à droite) pour un débit de 25 l/s*

En ajoutant en plus les résultats obtenus avec l'inclinaison à 30° (Tableau 30), on confirme que l'inclinaison joue un rôle important sur les phénomènes de pression et d'énergie cinétique. Les objectifs recherchés étant d'obtenir des gradients de pression et des taux d'énergie cinétique importants, il est plus intéressant d'utiliser des inclinaisons les plus petites possibles.

Inclinaison (°)	$\Delta P$ (Pa)	Energie cinétique turbulente max (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
30	150	0,035
45	100	0,030
60	60	0,020

**Tableau 30. Comparaison des caractéristiques hydrodynamiques en fonction de l'influence de l'angle d'inclinaison du métal pour un débit de 25 l/s**

## 2.1 Conséquences sur les pertes de charge

Si un angle fermé permet d'accentuer les phénomènes physiques, on peut s'attendre à ce que les pertes de charges augmentent également. En utilisant le calcul des puissances (équation (15) Partie 3), on peut quantifier les pertes de charges des différents cas testés. Une différence importante est visible pour des inclinaisons de 30° et 45° (environ 1cm). Par contre, il y a très peu de différence entre 45° et 60° (1 mm). Le coefficient de perte de charge  $K$  des différentes grilles, calculé à partir de l'équation (20) de la Partie 3, permet de mieux voir cette différence.

Inclinaison (°)	$\Delta H$ (m)	Coefficient $K$
30	0,054	1820
45	0,045	1520
60	0,044	1480

**Tableau 31. Comparaison des pertes de charge en fonction de l'influence de l'angle d'inclinaison du métal pour un débit de 25 l/s**

Cette étude mériterait d'être approfondie par la suite, en particulier pour établir une loi reliant l'inclinaison et les coefficients de pertes de charge. D'autre part, une approche numérique telle qu'employée permettrait de mettre au point des relations liant le coefficient de perte de charge avec la forme de la grille. Citons par exemple le cas de Meusburger (2001), où les formulations du coefficient  $K$  sont obtenues en utilisant une approche expérimentale.

### **3. TRANSPORT SOLIDE**

Les différents comportements hydrodynamiques observés pour les différentes grilles laissent à penser que l'utilisation d'une grille de type métal déployé sera moins sensible au colmatage par rapport à une plaque perforée. D'autre part, un questionnement sur l'impact de ces phénomènes sur la rétention de particules peut être fait. Ainsi, cette partie consiste à utiliser les approches lagrangiennes de transport solide pour visualiser la trajectoire des particules à proximité des orifices. L'utilisation des différents modèles de grilles permettra :

- de discuter de l'efficacité des différentes géométries
- de tester la sensibilité des particules faces aux phénomènes physiques provoqués par la grille

#### **3.1 Analyse qualitative des trajectoires entre une plaque perforée et une grille à métal déployé**

La première étape consiste à visualiser l'influence du type de grille. Nous avons observé auparavant des différences notables concernant l'hydrodynamique pour une grille de type métal déployé et une plaque perforée. Une plaque perforée génère moins de turbulence à l'amont de la grille et les gradients de pression sont moins importants à l'extrémité des bandelettes. Ces phénomènes jouent un rôle très important dans la dissipation des particules. Ainsi, la confrontation des simulations du transport solide pour les deux grilles devrait nous aider à visualiser l'influence de ces grandeurs sur les phénomènes de dissipation.

Dans le but de mettre en avant le rôle de ces propriétés hydrodynamiques sur le transport solide, nous avons choisi de simuler des particules de faibles masses volumiques ( $1040 \text{ kg/m}^3$ ). En effet, des particules de faibles masses volumiques seront plus facilement pilotées par l'hydrodynamique. Le diamètre des particules a quant à lui été fixé à  $200 \text{ }\mu\text{m}$ .

L'observation des trajectoires sur une plaque perforée montre que les particules pénètrent facilement dans les orifices. Les phénomènes turbulents n'ont qu'une faible incidence à l'extérieur de la grille (*Figure 200*). Concernant le champ de pression (*Figure 201*), on constate une zone de séparation des trajectoires à l'extrémité de l'orifice et correspondant au point de pression le plus élevé ( $50 \text{ Pa}$ ). Les

gradients de pression ont donc une influence certaine sur la séparation des particules dans cette zone. Cependant, la largeur de l'entrefer est suffisamment grande (5 mm) pour permettre aux particules de traverser la grille avec l'important gradient de pression.

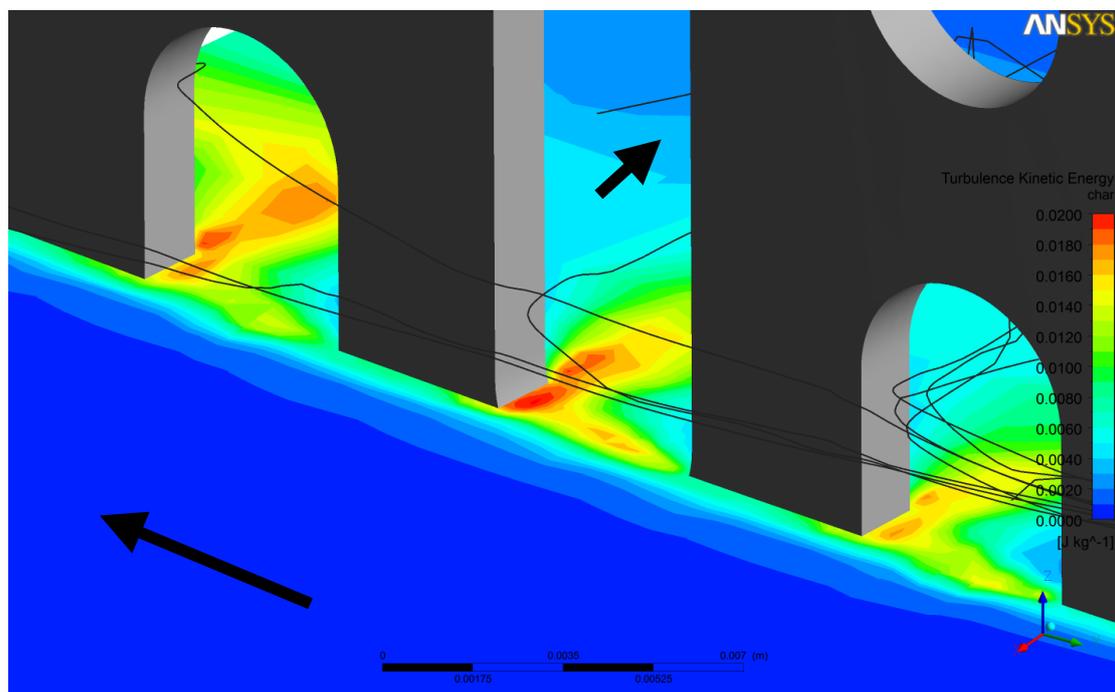


Figure 200. Trajectoires des particules de diamètre  $200 \mu m$  et de masse volumique  $1040 kg/m^3$  en fonction du champ d'énergie cinétique turbulente pour la plaque perforée avec des trous oblongs

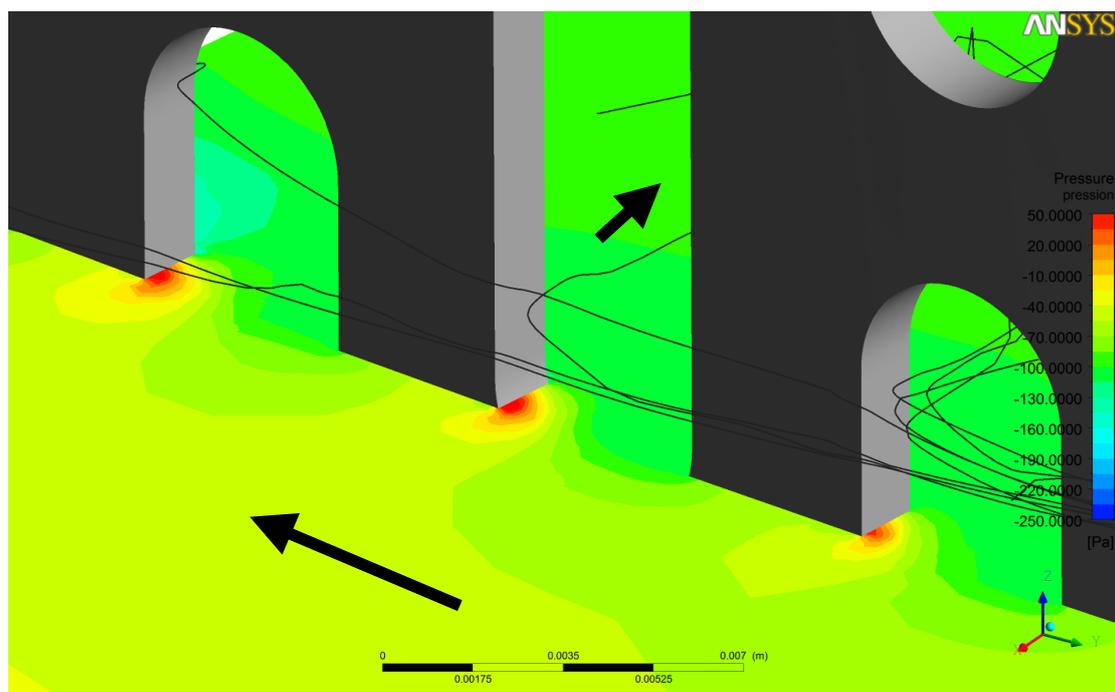
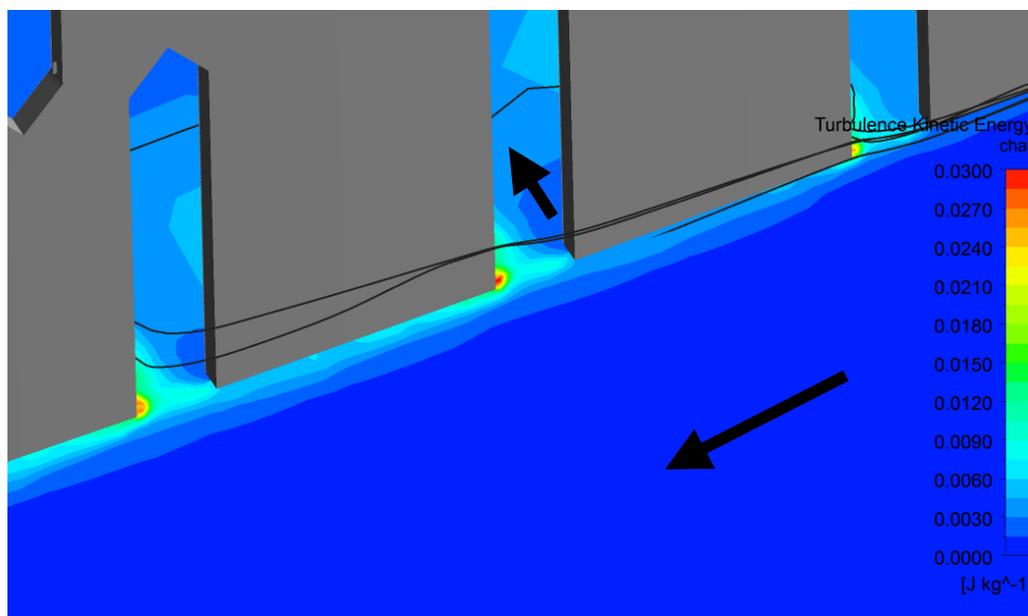
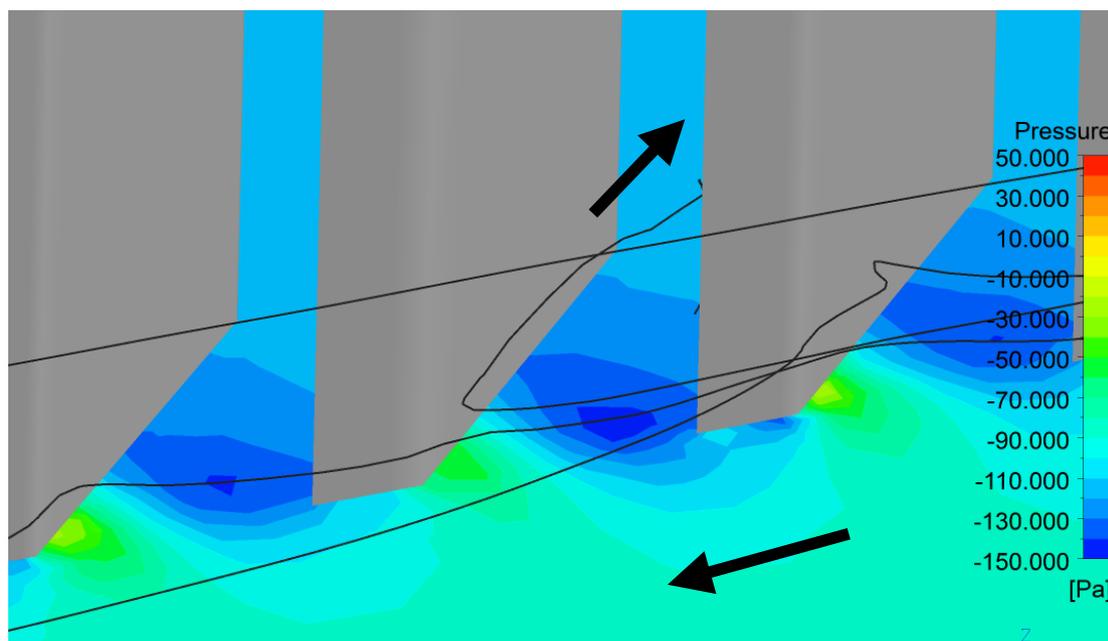


Figure 201. Trajectoires des particules de diamètre  $200 \mu m$  et de masse volumique  $1040 kg/m^3$  en fonction du champ de pression pour la plaque perforée avec des trous oblongs

Pour une plaque perforée avec des trous hexagonaux (grille n°3 du *Tableau 28*) le constat est identique. Cette configuration permet, par comparaison avec la plaque perforée composée de trous oblongs, de déterminer le rôle de la largeur des orifices. La *Figure 202* nous montre qu'en l'absence d'important gradient de pression ou d'important taux d'énergie cinétique turbulente, les particules passent facilement à travers la grille.

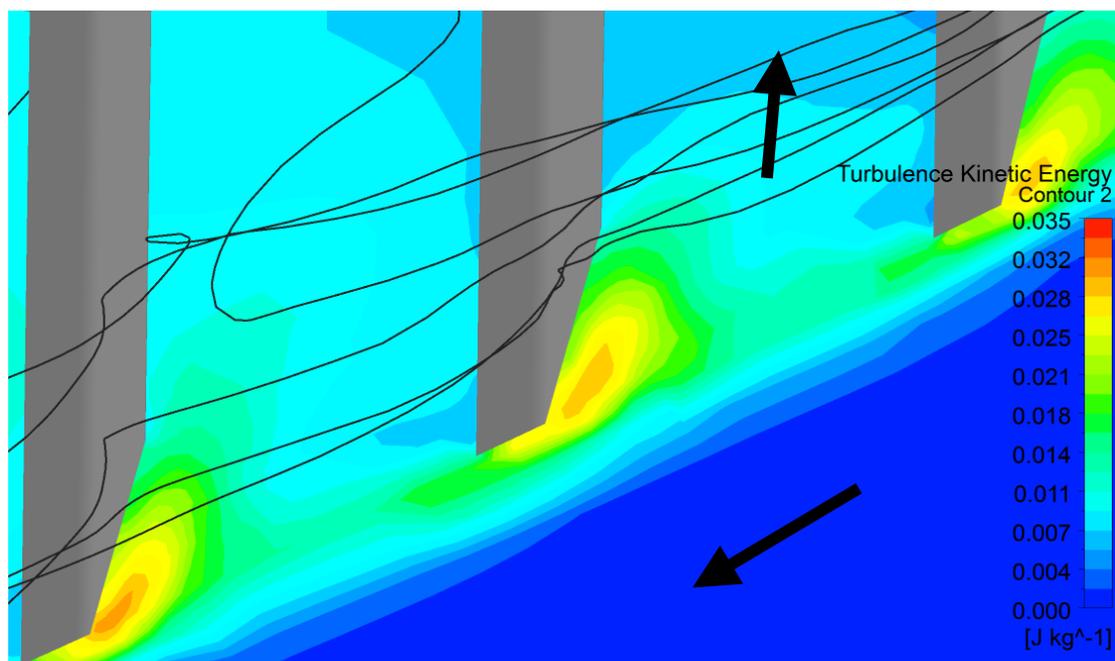


*Figure 202. Trajectoires des particules de diamètre 200  $\mu\text{m}$  et de masse volumique 1040  $\text{kg}/\text{m}^3$  pour la plaque perforée avec des trous hexagonaux*



*Figure 203. Trajectoires des particules de diamètre 200  $\mu\text{m}$  et de masse volumique 1040  $\text{kg}/\text{m}^3$  pour la grille de type métal déployé "petites mailles"*

L'utilisation de grilles à métal déployé permet de mettre en évidence un autre comportement. On peut observer sur la *Figure 203* la trajectoire particulière des particules. Lorsque des particules sont situées à proximité des orifices, certaines particules ont tendances à ressortir sous l'effet des pressions et des phénomènes de turbulence. Ce constat est aussi visible sur une grille "grandes mailles" (*Figure 204*). Malgré la diminution des phénomènes physiques lorsque l'on utilise des tailles d'orifices plus conséquentes, le phénomène "d'éjection" est toujours présent. Ceci prouve que la forme de la grille conditionne aussi bien les propriétés hydrodynamiques que le transport solide.



*Figure 204. Trajectoires des particules de diamètre 200  $\mu\text{m}$  et de masse volumique 1040  $\text{kg}/\text{m}^3$  pour la grille de type métal déployé "grandes mailles"*

### 3.2 Analyse quantitative sur la capacité des grilles à retenir des particules

Les trajectoires observées pour les différents cas de figures laissent à penser que les grilles à métal déployé ont une plus grande capacité à retenir des particules fines qu'une plaque perforée. Ainsi, et même si les modèles ne permettent pas d'établir la réelle efficacité de séparation de la grille, nous pouvons tout de même comparer les grilles entre elles. Il est donc nécessaire de tempérer les résultats de rétention définis par la suite, par le fait qu'en réalité, les particules n'effectuent pas un seul passage devant la grille (comme c'est le cas dans le modèle). En réalité, lorsqu'une particule entre dans l'ouvrage et qu'elle tourne autour de la grille, soit elle finit par décanter, soit elle continue de tourner.

L'objectif ici consiste à utiliser l'approche lagrangienne et déterminer pour chaque modèle la capacité de rétention de chaque grille. En utilisant des conditions hydrauliques similaires et des particules identiques, nous pourrions comparer les ratios "d'efficacité" et ainsi démontrer quantitativement l'influence de la forme des grilles.

Pour la comparaison, nous avons séparé la taille des orifices. En d'autres termes, le *Tableau 32* représente les valeurs obtenues en comparant les grilles avec des grandes ouvertures. Le *Tableau 33* présente les ratios pour des petites mailles.

Deux diamètres de particules sont étudiés :  $d_{50} = 35\mu\text{m}$  et  $d_{90} = 1200\ \mu\text{m}$ . Ces deux valeurs sont choisies pour observer l'influence du diamètre des particules. En ce qui concerne les valeurs présentées dans le tableau, nous avons utilisé le pourcentage de particules retenu par les deux grilles pour établir un ratio. Le ratio métal déployé/plaque perforée permet d'évaluer et chiffrer la performance d'une grille par rapport à l'autre.

Pour les grilles "grandes mailles", la comparaison montre que la grille de type métal déployé est légèrement plus efficace par rapport à une plaque perforée. On remarque que les performances augmentent avec la taille et la masse volumique des particules. Pour des faibles diamètres, le ratio est constant (1,1). En revanche, le ratio augmente pour des particules de  $1200\ \mu\text{m}$  (1,3). Ce résultat montre que l'efficacité d'une grille à métal déployé par rapport à une plaque augmente encore lorsque l'on a des diamètres et des masses volumiques importants.

	masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				
	1040	1200	1500	1700	2500
35 $\mu\text{m}$	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
1200 $\mu\text{m}$	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3

*Tableau 32. Comparaison des ratios entre une plaque perforée et une grille de type métal déployé avec des grandes mailles*

De la même manière, nous avons comparé les grilles avec des petites mailles (*Tableau 33*). Les ratios obtenus permettent d'établir la même conclusion : la grille à métal déployé permet de retenir 1,5 plus de particules de  $35\ \mu\text{m}$  de diamètre qu'une plaque perforée. L'influence de la masse volumique est également constatée pour les particules de  $1200\ \mu\text{m}$  de diamètre. Le ratio a tendance à augmenter en diminuant la masse volumique des particules. Pour des masses volumiques de  $2500\ \text{kg}/\text{m}^3$ , le ratio est de 1,4 alors qu'il est de 1,9 pour  $1040\ \text{kg}/\text{m}^3$ . Ces chiffres montrent donc que la grille à métal déployé

est encore plus efficace qu'une plaque pour capturer des particules de forts diamètres et de faibles masses volumiques.

	masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )				
	1040	1200	1500	1700	2500
<b>35 µm</b>	1,5	1,6	1,6	1,5	1,5
<b>1200 µm</b>	1,9	1,9	1,8	1,6	1,4

*Tableau 33. Comparaison des ratios entre une plaque perforée et une grille de type métal déployé avec des petites mailles*

La confrontation entre les deux tableaux permet de dégager un autre constat. Les ratios obtenus pour les petites mailles sont plus importants que pour les grilles grandes mailles. Une analogie peut être faite ici avec la valeur des phénomènes de pression et de turbulence observés sur les différentes grilles. Nous avons observé précédemment une accentuation des phénomènes physiques à proximité des bandelettes en utilisant des petites mailles. Par analogie, on peut faire l'hypothèse ici que cette accentuation permet d'augmenter la rétention de particules.

Pour synthétiser, l'utilisation d'une grille à métal déployé permet d'augmenter la rétention des particules par rapport à une plaque perforée. De plus, cette rétention peut être accentuée en diminuant la taille des orifices.

## CONCLUSION DE LA PARTIE 5

Ce chapitre a permis de mettre en application les modèles numérique 3D dans l'optique d'optimiser le séparateur hydrodynamique.

L'utilisation de l'approche multi-échelle a permis d'utiliser :

- le modèle global, dans l'objectif de tester différents aménagements
- le modèle local, dans l'objectif de tester différentes configurations de grilles

L'utilisation du modèle global a permis de tester l'influence de différents aménagements sur l'écoulement et le transport solide. Dans l'objectif d'accentuer les vitesses à proximité de la grille et de diminuer les vitesses dans le fond, l'installation d'une plaque horizontale semble être la meilleure configuration. Cependant, d'autres idées d'aménagements méritent d'être testées par la suite. Précisons qu'il faut tout de même rester attentif sur la complexité de l'aménagement. Il doit permettre une exploitation et une maintenance aisée.

L'utilisation du modèle local a permis de tester différentes géométries de grilles. Les résultats ont mis en évidence les différences des phénomènes physiques que l'on peut obtenir à proximité des orifices. L'utilisation d'une grille de type métal déployé permet d'accentuer les gradients de pression et les phénomènes de turbulence à l'amont de la grille. L'application d'une approche lagrangienne a permis, en visualisant la trajectoire, mais également par comparaison avec une plaque perforée, de démontrer l'efficacité des grilles de types métal déployé.

# PARTIE 6

## ETUDE D'UN OUVRAGE GRANDEUR NATURE

---

<b>Introduction de la partie 6 .....</b>	<b>222</b>
<b>I. Etude expérimentale.....</b>	<b>223</b>
1. Situation géographique et données topographiques.....	223
2. Instrumentation du site.....	225
2.1 Mesure du débit.....	226
2.2 Mesure des hauteurs d'eau.....	227
3. Analyse des données.....	227
3.1 Analyse des débits.....	227
3.2 Analyse des hauteurs.....	230
3.3 Fonctionnement du déversoir.....	231
4. Exploitation et Maintenance - Analyse qualitative de l'efficacité.....	233
<b>II. Modélisation numérique de l'ouvrage .....</b>	<b>236</b>
1. Analyse du comportement hydraulique global .....	236
1.1 Analyse de la surface libre .....	237
1.2 Analyse des vitesses et des débits en circulation .....	240
<b>Conclusion de la partie 6 .....</b>	<b>242</b>

## INTRODUCTION DE LA PARTIE 6

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le fonctionnement hydraulique d'un ouvrage grandeur nature mais aussi de tester le champ d'application de la méthode numérique.

Par rapport à des expériences en laboratoire, l'étude *in situ* est beaucoup plus contraignante car les conditions ne sont généralement pas maîtrisées : pluie, débit dans l'ouvrage, origines et caractéristiques des polluants. De plus, des opérations de maintenance ont permis de vérifier l'état des données et du fonctionnement de l'ouvrage. L'ensemble de l'étude expérimentale est décrite dans une première partie.

Dans la deuxième partie, on se propose d'appliquer la méthode numérique pour observer le comportement hydraulique d'un ouvrage de terrain. Ce modèle aura pour but de visualiser le fonctionnement de la surverse de sécurité ainsi que l'évolution des champs de vitesse et des hauteurs d'eau au sein de l'ouvrage.

# I. ETUDE EXPERIMENTALE

## 1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET DONNEES TOPOGRAPHIQUES

L'ouvrage de Trouville-sur-Mer se situe en aval d'un réseau pluvial strict et immédiatement à l'amont de l'exutoire se déversant dans la mer (*Figure 205*). L'évacuation des eaux de pluies provenant des bassins versants amont se fait dans une canalisation de 500 m de long et de diamètre DN800. La pente moyenne de cette canalisation est de 1,6 %, ce qui correspond à une pente hydrauliquement forte.



*Figure 205. Situation géographique de l'ouvrage de Trouville (photo: Google Earth)*

Contrairement au pilote expérimental, l'ouvrage dispose d'un déversoir de sécurité permettant d'évacuer les débits trop importants en cas d'événements intenses ou si l'ouvrage est rempli de déchets. Ainsi, dans l'objectif de construire un modèle tridimensionnel du site, des relevés topographiques du site ont été effectués par des mesures au laser et au théodolite. La connaissance de la taille de l'ouvrage, des caractéristiques du déversoir, des pentes, de l'angle des coudes ou encore des diamètres des canalisations est essentielle pour reproduire numériquement le comportement hydraulique.

Concernant les dimensions, la conduite d'entrée du séparateur est rectangulaire (0,5 m x 0,3 m) (*Figure 207*), le diamètre extérieur est de 3,0 m et celui de la partie centrale (grille) de 1,5 m (*Figure 206*). La hauteur de l'ouvrage est de 5,2 m et le radier de la canalisation d'entrée se situe à 2,6 m par rapport au fond de l'ouvrage. La sortie du CycloneSep<sup>®</sup> s'effectue par une canalisation circulaire de 800 mm de diamètre et remonte dans une paroi siphonide (zone d'évacuation du déversoir) avant l'évacuation vers l'exutoire (canalisation de 800 mm de diamètre dont le radier se situe 7 mm sous le

radier de la canalisation amont). Concernant la partie déversante, la hauteur de crête oblique est de 0,56 m (Figure 208).

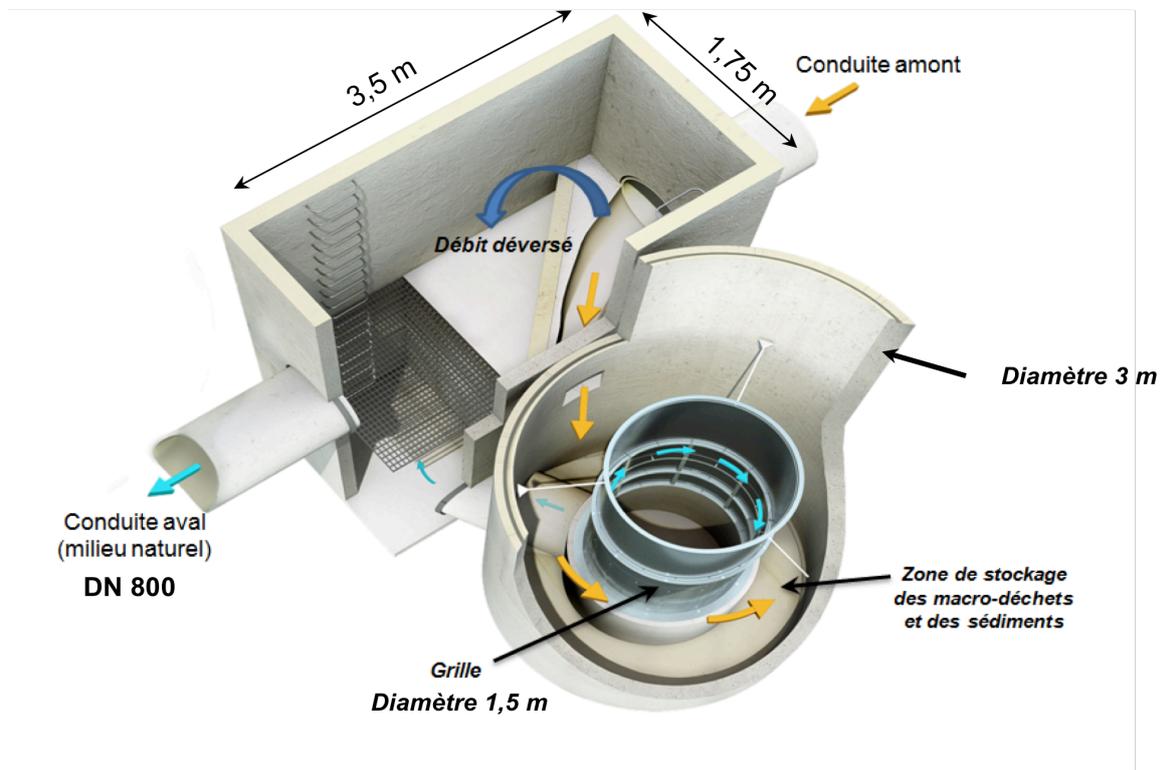


Figure 206. Illustration de l'ouvrage de Trouville-sur-Mer

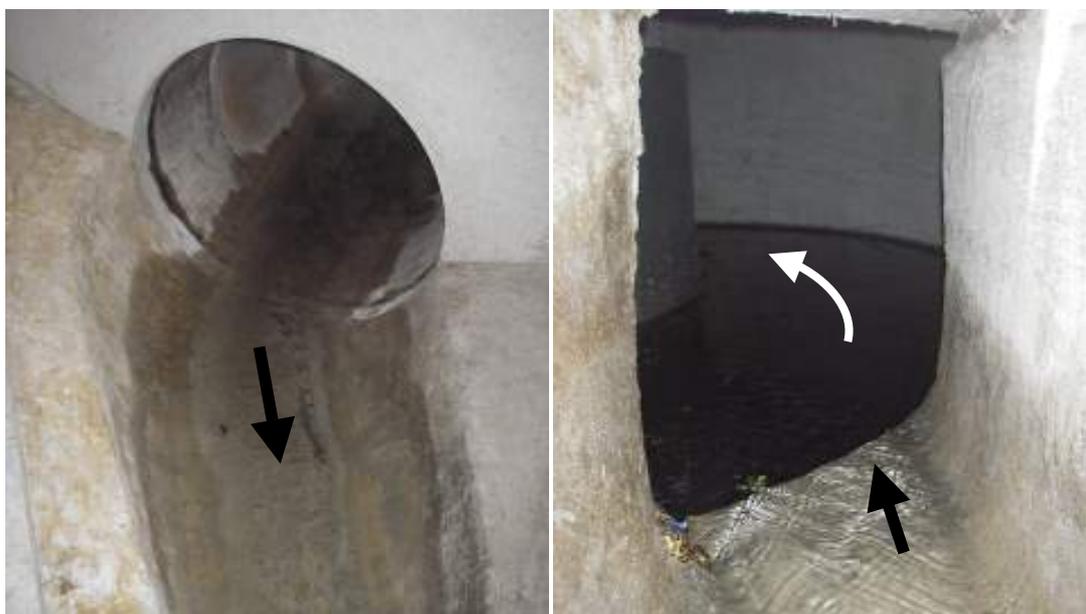


Figure 207. Canalisation amont DN800 du déversoir (à gauche) et entrée dans le séparateur (à droite)

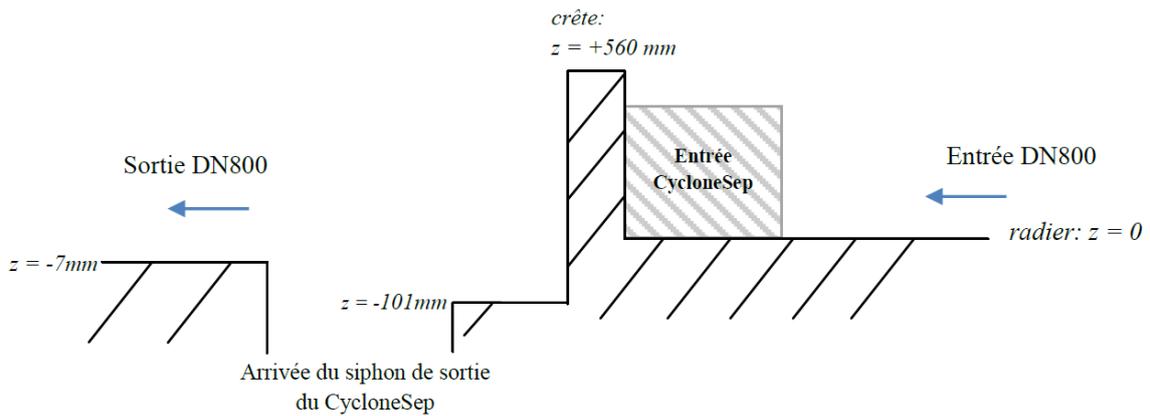


Figure 208. Vue en coupe de la partie déversoir de l'ouvrage de Trouville-sur-Mer

## 2. INSTRUMENTATION DU SITE

L'instrumentation du site a pour but d'évaluer le comportement hydraulique de l'ouvrage. L'étude du fonctionnement de la surverse est également un point d'investigation.

Nous avons donc fait le choix d'utiliser des capteurs de hauteur d'eau ainsi qu'un capteur de type "hauteur-vitesse" (Figure 209). L'installation des différentes sondes a été effectuée le 13 octobre 2011 et elles ont été retirées le 27 avril 2012. Plusieurs opérations de maintenance ont été réalisées durant cette période (Tableau 34).

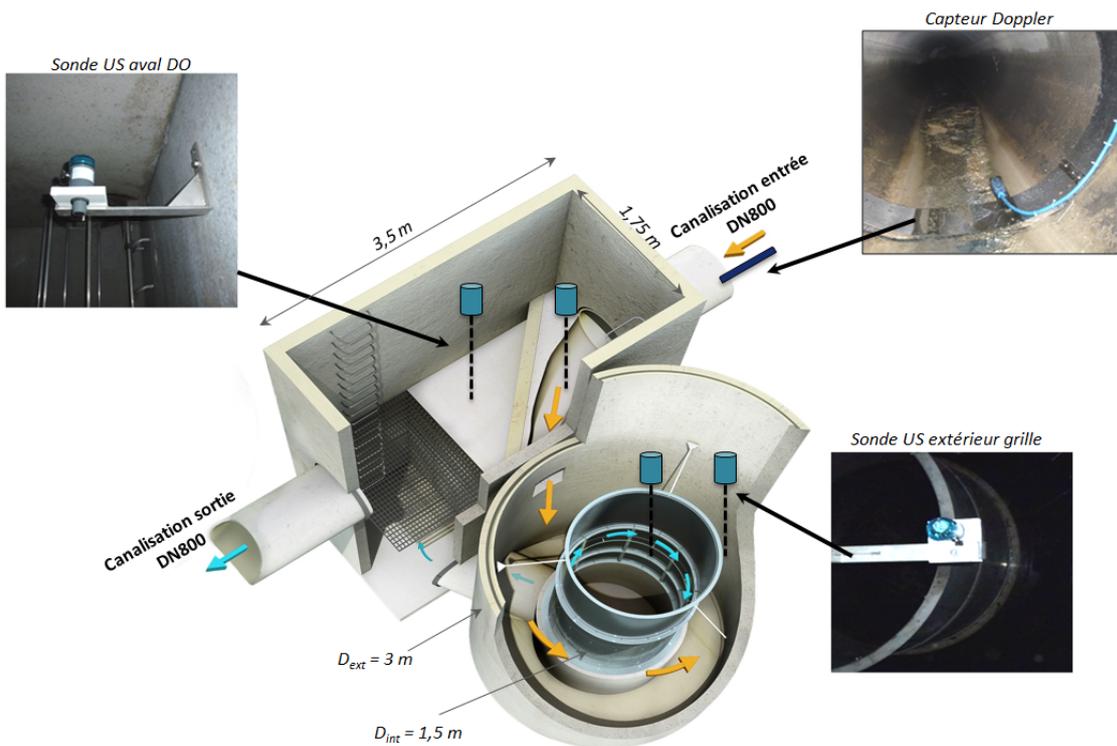


Figure 209. Instrumentation de l'ouvrage de Trouville-sur-Mer

Date	Objet de la visite
12/10/2011	Instrumentation - Vidange après 1 an de fonctionnement
4/11/2011	Vérification instrumentation - Etat du Doppler (présence de dépôts)
13/01/2012	Vérification instrumentation - Récupération partielle des données
27/04/2012	Récupération des données - Désinstallation des sondes

*Tableau 34. Interventions sur le site de Trouville-sur-Mer*

## 2.1 Mesure du débit

Pour mesurer le débit transitant dans l'ouvrage, un capteur Doppler continu de type "hauteur-vitesse" (*Nivus PCM 3*) a été placé dans la canalisation amont (*Figure 210*). Le capteur a été placé au moyen d'une hanse à environ 1 m en amont de l'ouvrage.

Concernant l'acquisition des données, le capteur mesure une hauteur et une vitesse moyenne pendant 60 secondes toutes les 15 minutes. L'incertitude de mesure donnée par le constructeur est de +/- 3 mm sur les hauteurs d'eau (ou +/- 0,5 % de la mesure) et +/- 0,03 m/s sur les vitesses (ou +/- 1 % de la mesure) (Nivus, 2003). Notons tout de même que ces incertitudes sont valables dans des conditions optimales. Même avec une maintenance régulière, ce type de capteur ne permet de connaître le débit qu'avec une incertitude relativement importante du fait du lien souvent complexe entre la vitesse mesurée par le capteur et la vitesse moyenne nécessaire au calcul du débit.



*Figure 210. Installation du capteur Doppler continu dans la conduite le 12 octobre 2011 (à gauche) et visualisation du dépôt sur le capteur le 13 janvier 2013 (à droite)*

En raison des dépôts observés sur la tête du capteur (photo de droite de la *Figure 210*), les données entre le 13 octobre 2011 et le 13 janvier 2012 se sont révélées être inutilisables. En raison des conditions très dégradées d'utilisation de ce capteur, nous avons calculé le débit à partir des mesures de hauteurs d'eau à l'aval du déversoir. Cette méthode est expliquée par la suite.

## 2.2 Mesure des hauteurs d'eau

Quatre capteurs de niveau d'eau (sondes autonomes à ultrasons *Ijinus LNU 300S*) ont été placés dans l'ouvrage (*Figure 209*) pour :

- mesurer les phénomènes de déversements à l'aide de capteurs placés de part et d'autre de la crête du déversoir de trop plein,
- mesurer les différences de hauteurs d'eau au niveau de la grille à l'aide de capteurs placés à l'intérieur et à l'extérieur de la grille.

Chaque capteur a été étalonné et réglé pour mesurer une hauteur d'eau toutes les 5 minutes. L'incertitude de mesure associée aux capteurs LN 300S, dont la plage de mesure se situe entre 0,2 et 3 m, est de +/- 7 mm pour une hauteur d'eau située entre 0,2 et 3 m (Ijinus, 2011).

## 3. ANALYSE DES DONNEES

Avant même de s'intéresser aux données récupérées sur le site, il est nécessaire de visualiser les phénomènes pluviométriques qui ont eu lieu à proximité du site. Les données pluviométriques de Deauville (commune voisine de Trouville) correspondant à la période d'instrumentation sont représentées sur la *Figure 211*.

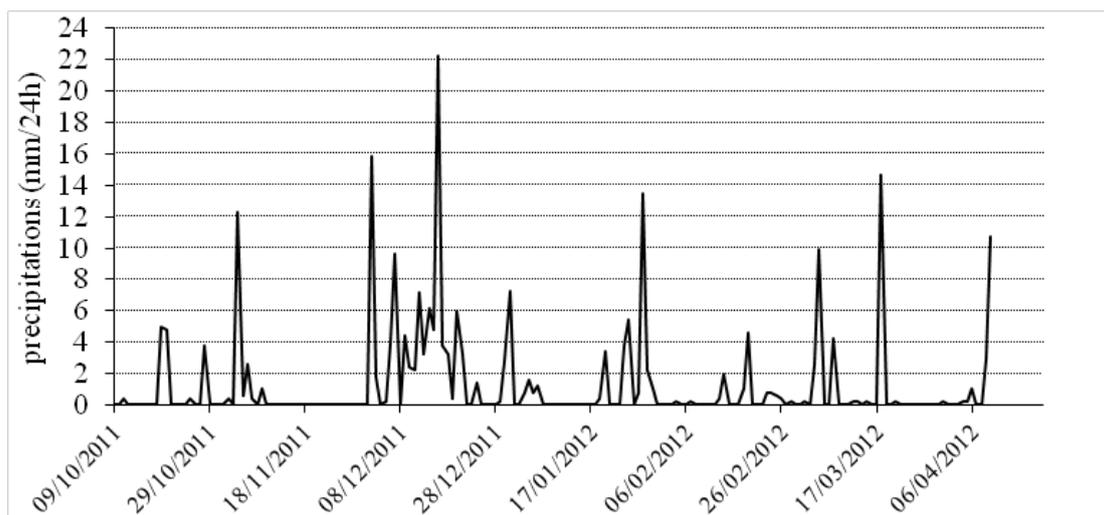


Figure 211. Données pluviométriques enregistrées à Deauville (source meteociel.fr)

### 3.1 Analyse des débits

#### Calcul du débit à partir des hauteurs aval du déversoir

Les conditions géométriques du site de Trouville permettent de déterminer le débit transitant par l'ouvrage à partir des mesures de hauteur d'eau à l'aval de la crête. La sortie de l'ouvrage est constituée

d'une canalisation de forte pente prenant naissance dans la chambre siphonide (*Figure 212*). S'il n'y a pas d'influence aval dans cette canalisation, alors cette configuration correspond à une diminution de la section de passage de l'écoulement. D'un point de vue hydraulique, cette configuration est responsable d'un effet Venturi caractérisé par le passage d'un régime fluvial (dans la chambre) à un régime torrentiel (dans la canalisation). En termes énergétiques, l'écoulement dispose d'une énergie principalement potentielle en amont de l'engouffrement et une énergie cinétique en aval. Entre les deux, l'écoulement passe par le régime critique, pour lequel il y a un lien direct  $Q = f(h_c)$ . En prenant en compte les pertes de charge provoquées par l'engouffrement, on peut calculer la charge à l'aval du déversoir, correspondant à la hauteur d'eau. Le détail de la méthode est donné en *Annexe C*.



*Figure 212. Chambre siphonide et canalisation de sortie de l'ouvrage*

La relation hauteur/débit obtenue à l'aide de cette méthode s'écrit :

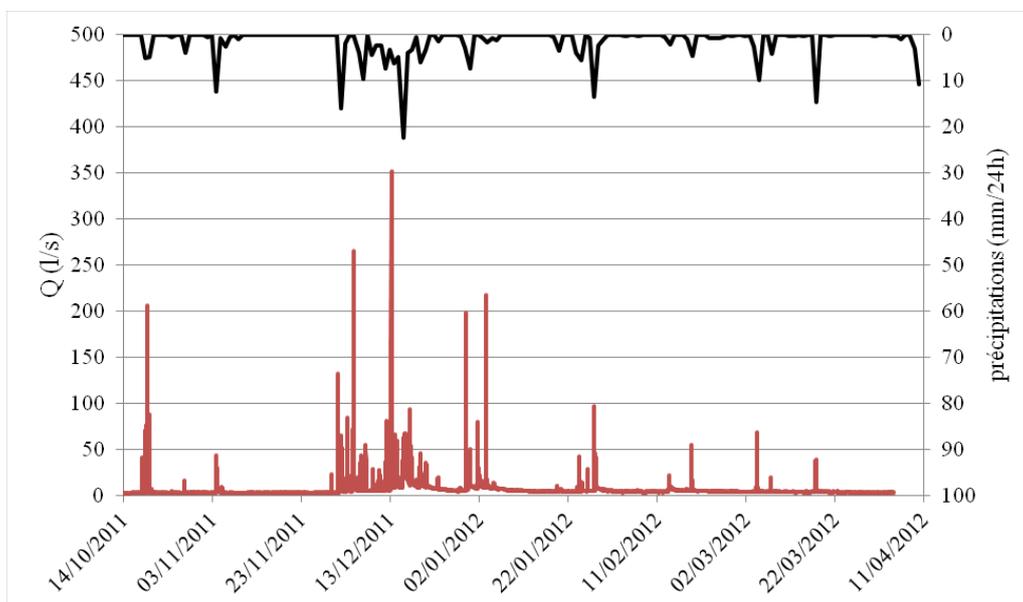
$$Q = 0,004 - 0,01h + 1,45h^2 - 0,55h^3 \quad (32)$$

avec  $Q$  le débit en  $m^3/s$  et  $h$  la hauteur en m. Notons que l'erreur maximale commise est inférieure à 5%.

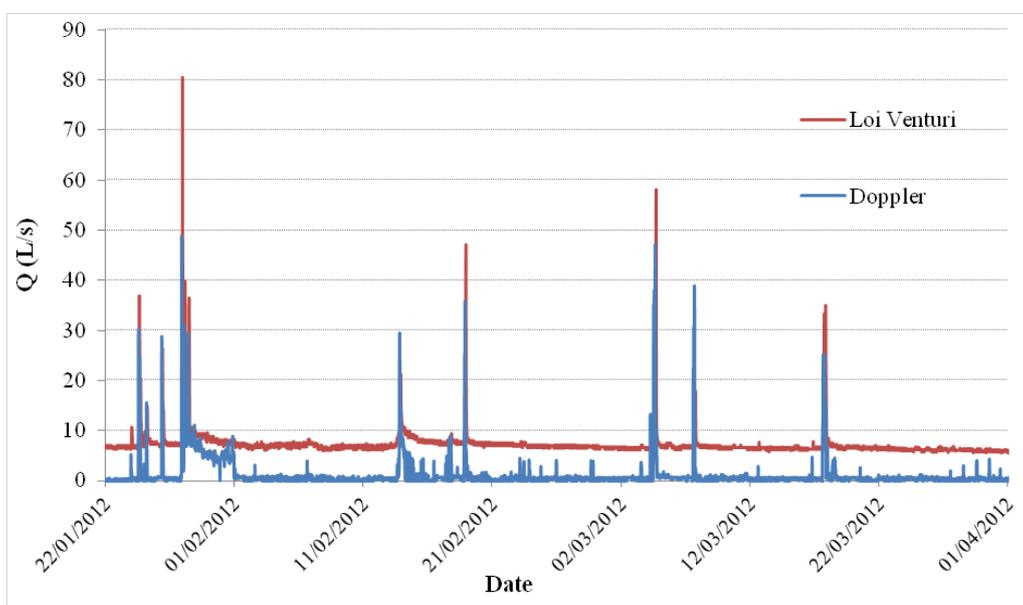
Par comparaison avec le capteur Doppler, on observe des différences relatives pouvant atteindre 50 % (*Figure 214*). Autrement dit, les différences obtenues avec les deux méthodes sont importantes.

L'utilisation de la loi Venturi permet également d'observer la présence d'un débit continu correspondant à une source (environ 6 l/s et une hauteur d'environ 5 cm).

La *Figure 213* représentant les débits pour la durée totale instrumentée permet de relever cinq débits importants (supérieurs à 100 l/s) et un très important (supérieur à 250 l/s). On notera, en observant les précipitations, que ces débits correspondent à de fortes périodes pluvieuses, notamment pendant le mois de décembre 2011.



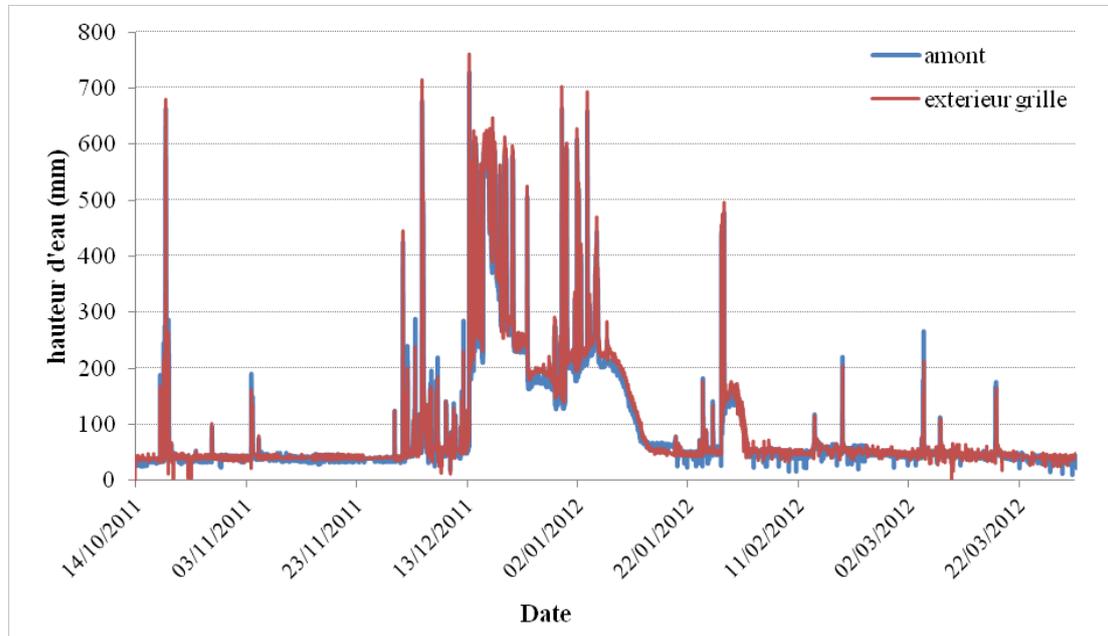
**Figure 213.** Débits calculés à partir des mesures de hauteurs d'eau et précipitations à Deauville



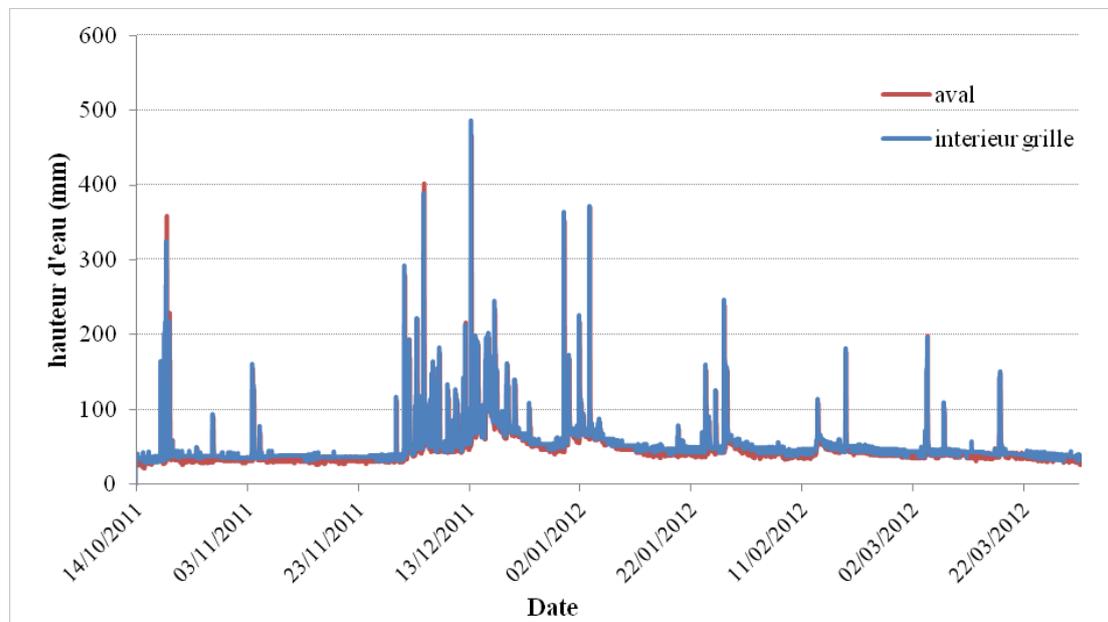
**Figure 214.** Comparaison des deux méthodes de mesure du débit

### 3.2 Analyse des hauteurs

Concernant les hauteurs d'eau, on constate que la hauteur à l'amont du déversoir est identique à la hauteur d'eau à l'extérieur de la grille du séparateur (*Figure 215*). Le même constat est observé pour les hauteurs d'eau à l'aval du déversoir et à l'intérieur de la grille (*Figure 216*). Ces résultats montrent que les pertes de charge se situent essentiellement au niveau de la grille.



*Figure 215. Mesures des hauteurs d'eau à l'amont du déversoir et à l'extérieur de la grille (hauteur par rapport au radier d'entrée)*



*Figure 216. Mesures des hauteurs d'eau à l'aval du déversoir et à l'intérieur de la grille (hauteur par rapport au radier d'entrée)*

### 3.3 Fonctionnement du déversoir

Les capteurs de hauteurs situés de part et d'autre de la crête permettent également de visualiser le fonctionnement de la surverse. La *Figure 217* permet de quantifier les épisodes de déversements : le 19 octobre 2011; le 4, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21 et 30 décembre 2011 ; le 1 et 3 janvier 2012.

On remarque également que le niveau d'eau à l'aval est toujours inférieur à la cote de la crête. Cela signifie que le déversoir a fonctionné en régime dénoyé, ou encore que la capacité d'évacuation aval est suffisamment importante pour éviter une montée trop importante de la hauteur à l'aval du déversoir.

En se rapportant aux débits correspondants à ces événements, on peut évaluer le débit à partir duquel le déversoir fonctionne. La *Figure 218* permet d'observer les hauteurs d'eau à l'amont, la hauteur de crête ainsi que le débit.

En visualisant par exemple l'évènement du 19 octobre 2011, on observe un déversement pour un débit d'environ 160 l/s. D'autre part, le 5 décembre, le débit a atteint 200 l/s avec un niveau d'eau qui est monté entre 10 et 15 cm au-dessus de la crête.

A partir du 13 décembre, on constate la présence de plusieurs surverses pour des faibles débits (inférieur à 50 l/s). Cette observation est intéressante car elle permet de faire un lien direct avec les expériences réalisées en laboratoire avec les feuilles. En effet, lors des expériences de colmatage, nous avons observé un comportement similaire, à savoir une remontée du niveau d'eau à l'amont de la grille. Par conséquent, l'hypothèse la plus plausible est qu'à cette période, soit l'ouvrage est rempli de déchets, soit la grille est colmatée.

Une autre remarque que l'on peut faire concerne la période pendant laquelle on observe ce comportement. Les mois de septembre à novembre correspondent à une saison propice à la chute des feuilles d'arbres. Autant considéré cette période de l'année comme propice au remplissage et au colmatage. Il convient donc de contrôler et de vidanger l'ouvrage au cours de ses périodes.

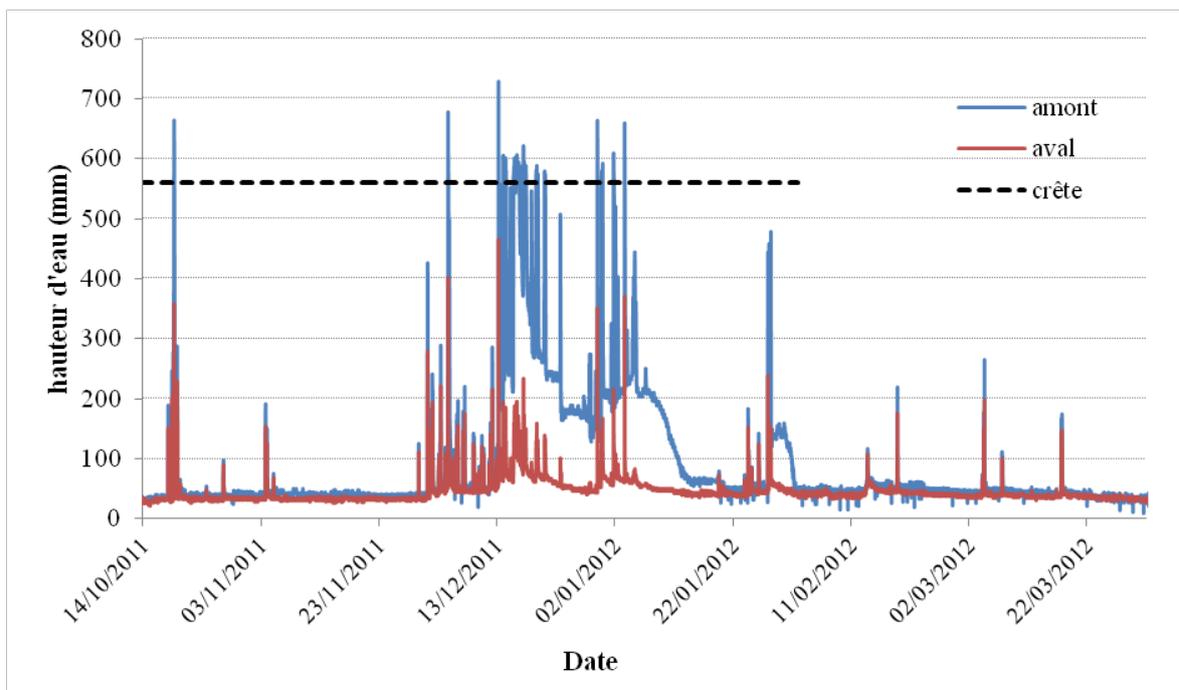


Figure 217. Mesures des hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du déversoir (hauteur par rapport au radier d'entrée)

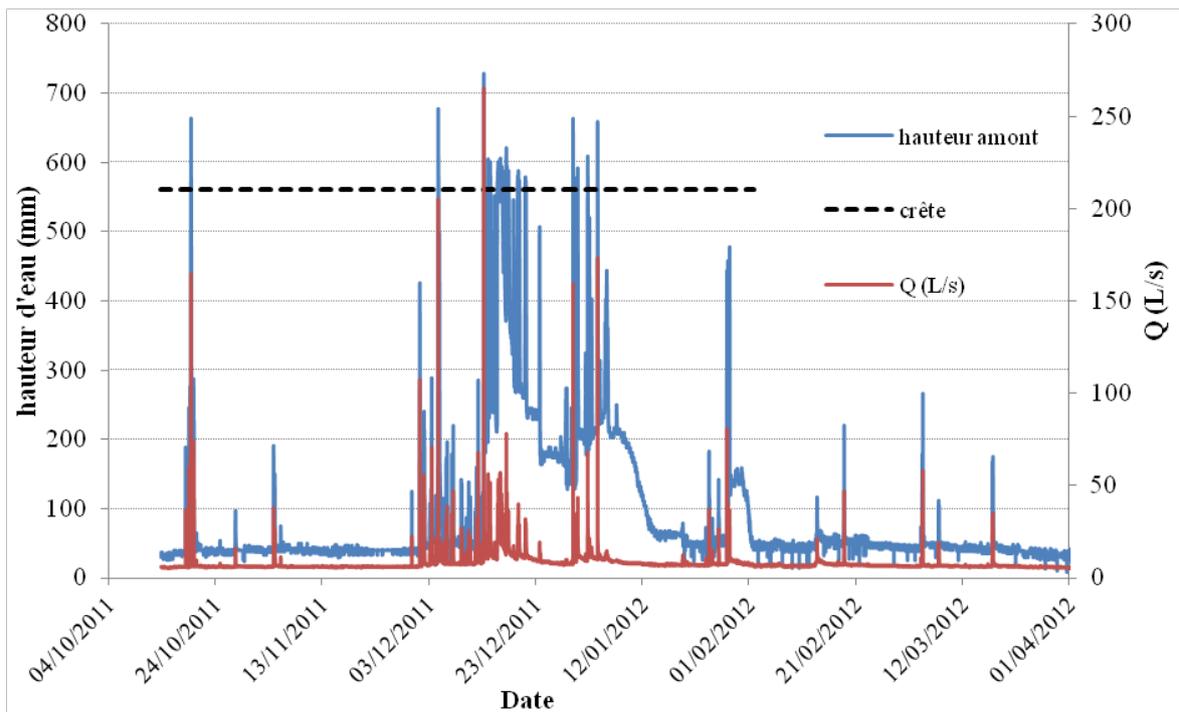


Figure 218. Mesures des hauteurs d'eau à l'amont et mesure du débit

#### 4. EXPLOITATION ET MAINTENANCE - ANALYSE QUALITATIVE DE L'EFFICACITE

Si l'objectif de l'étude de terrain était de constater le bon fonctionnement hydraulique de l'ouvrage, nous en avons tout de même observé l'efficacité en termes de rétention de polluants. Les visites de terrain, notamment dans le cadre de la maintenance de l'ouvrage et de son instrumentation, ont permis d'observer l'état général au cours du temps (*Tableau 34*).

Lors de la première visite, le 12 octobre 2011, soit environ un an après la mise en service de l'ouvrage de Trouville, nous avons pu observer la capacité de l'ouvrage à retenir des flottants (*Figure 219*). Une centaine de litres de flottants a été récupérée par les camions hydrocureurs. Parmi ces flottants, on y retrouve les macro-déchets classiques tels que les bouteilles, les sacs plastiques, les mégots mais aussi des jouets. En revanche, en janvier, nous avons constaté la présence d'une grosse quantité de feuilles et de branches (*Figure 220*). Puis à la fin du mois d'avril, nous avons retrouvé un peu plus de flottants avec notamment la présence importante de mégots (*Figure 221*).

Le suivi régulier de l'ouvrage nous a montré la capacité de l'ouvrage à retenir les flottants. Nous avons observé des périodes propices au nettoyage. Après la saison estivale et la période touristique, l'ouvrage a tendance à être chargé en déchets plastiques (bouteilles, sacs et jouets). Après l'automne, l'ouvrage récupère une grande quantité de verdure (feuilles et branches) pouvant perturber le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage en favorisant, par exemple, le colmatage de la grille. C'est ce qui peut expliquer le comportement de l'ouvrage à partir du 13 décembre.

Par ailleurs, lors de la vidange du 13 octobre 2011, environ 6 m<sup>3</sup> de sédiments ont été récupérés dans le séparateur. Ce constat montre que l'ouvrage permet également de retenir des particules très fines, soit par sédimentation, soit par séparation tangentielle. Aucune analyse granulométrique précise n'a cependant été effectuée pour caractériser les sédiments retrouvés dans l'ouvrage.

Un autre point à souligner concerne la maintenance et les périodes de vidange. En effet, en terme d'exploitation, l'ouvrage nécessite très peu d'entretien et la vidange par un camion hydrocureur se fait très rapidement (1/2 journée avec deux camions pour l'ouvrage de Trouville (*Figure 222*)). La principale difficulté est de déterminer la période propice à la vidange. Pour répondre à ce problème, l'instrumentation peut être une solution intéressante. Les seules données à l'amont et à l'aval du déversoir nous ont permis de visualiser un dysfonctionnement hydraulique (colmatage ou remplissage de l'ouvrage). Pour synthétiser, l'exploitation et la maintenance de l'ouvrage peuvent être facilitées par l'installation de deux capteurs de hauteur d'eau : un capteur à l'amont du déversoir pour mesurer les hauteurs et un capteur à l'aval pour calculer le débit transitant dans l'ouvrage. Ainsi, la maintenance de l'ouvrage se traduit par le traitement des données, puis d'une vidange dans le cas de données suspectes (par exemple l'observation d'un déversement pour un faible débit).



*Figure 219. Photographie de l'ouvrage de Trouville le 12 octobre 2011*



*Figure 220. Photographie de l'ouvrage de Trouville le 13 janvier 2012*



*Figure 221. Photographie de l'ouvrage de Trouville le 27 avril 2012*



*Figure 222. Vidange de l'ouvrage de Trouville (12 octobre 2011)*

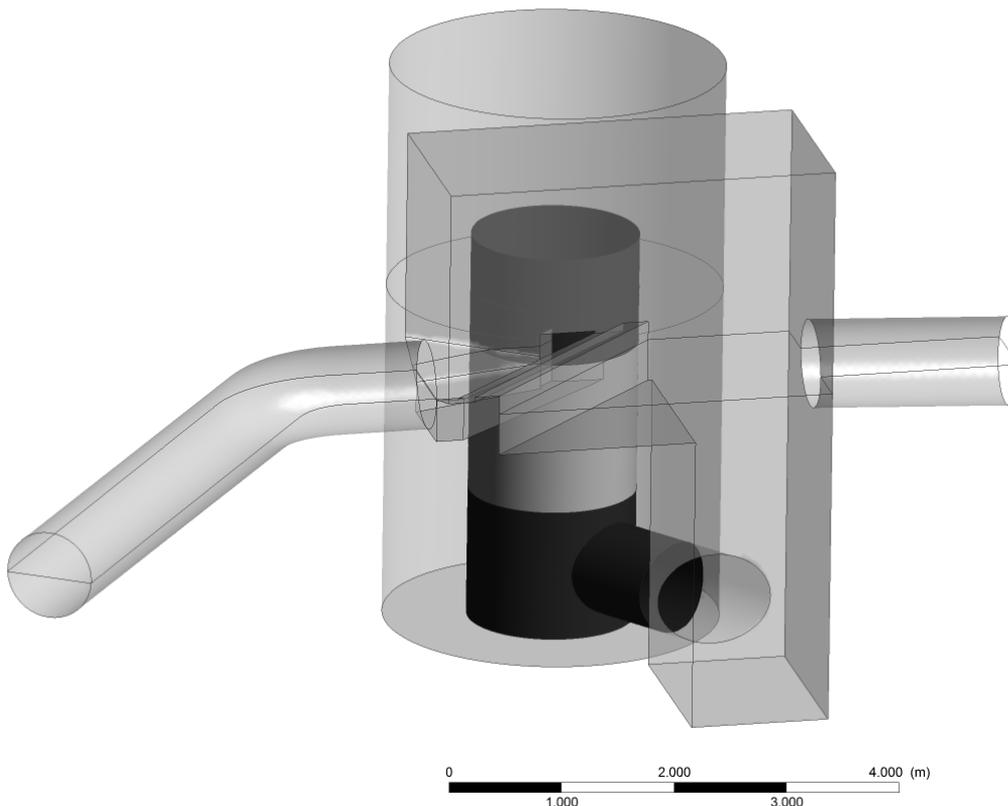
## II. MODELISATION NUMERIQUE DE L'OUVRAGE

La validation du modèle global de l'ouvrage à l'aide du pilote expérimental du laboratoire, nous permet d'appliquer cette technique à l'ouvrage réel de Trouville. L'objectif de cette partie est d'analyser le comportement hydraulique de l'ensemble du système (séparateur avec déversoir). D'autre part, les données expérimentales obtenus permettront de valider une seconde fois le modèle, mais avec des critères de comparaison basés sur les hauteurs d'eau. La modélisation permettra en revanche de visualiser l'allure de la surface libre ainsi que la distribution des vitesses au sein de l'ouvrage.

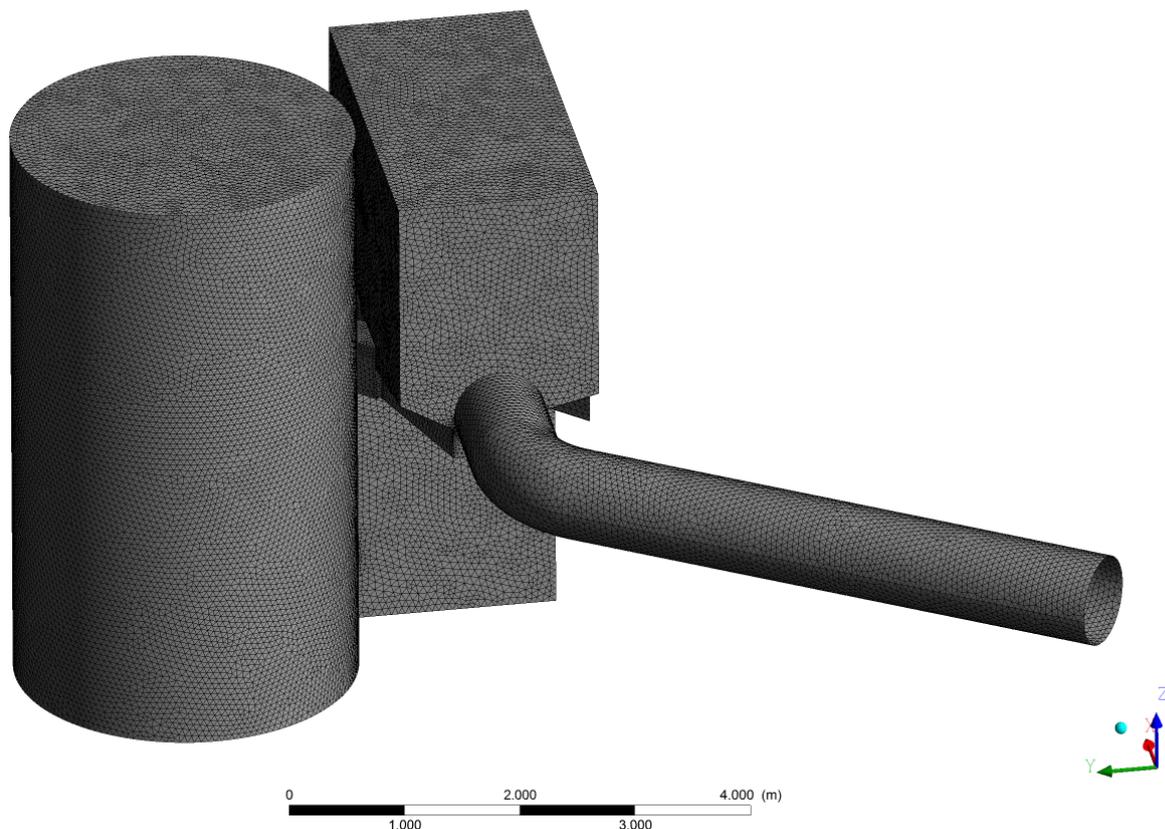
### 1. ANALYSE DU COMPORTEMENT HYDRAULIQUE GLOBAL

Les données topographiques ont permis de reconstruire la géométrie du site de Trouville/Mer (*Figure 223*). La grille installée sur le site étant la même que celle du pilote expérimental (petites mailles), nous avons utilisé les mêmes caractéristiques de porosité pour le modèle ( $K = 1890$ ).

Concernant le maillage, nous avons opté pour des mailles tétraédriques en raison de la divergence du calcul lors de l'utilisation de la méthode *Cut-Cell Meshing*. La modèle a nécessité environ 2 400 000 mailles (*Figure 224*).



*Figure 223. Géométrie de l'ouvrage de Trouville*



**Figure 224. Maillage de l'ouvrage de Trouville**

Concernant les conditions de simulations, nous avons simulé l'écoulement par une méthode *RANS* et un modèle *RSM*. D'autre part, en raison de la chambre siphonoïde sur le site, une condition de pression atmosphérique est appliquée sur la conduite de sortie pour évacuer l'eau vers l'exutoire.

Les débits simulés pour cet ouvrage vont de 100 l/s à 300 l/s par pas de 50 l/s de manière à balayer une plage de faible à fort débits, avec et sans fonctionnement du déversoir.

### **1.1 Analyse de la surface libre**

Les simulations pour les cinq débits ont mis en évidence l'allure de la surface libre et le fonctionnement de la surverse. Pour un débit de 200 l/s, la surface libre se situe au niveau de la crête et un léger débit est déversé (*Figure 225*). Pour des débits plus importants (300 l/s), on peut observer des ondulations dues à la chute dans la partie siphonoïde (*Figure 226*).

Ainsi qu'observé sur le site, l'analyse des hauteurs d'eau pour les différents débits montre que les hauteurs à l'extérieur de la grille sont proches des hauteurs à l'amont du déversoir (*Tableau 35*). Il en

va de même pour les hauteurs à l'intérieur de la grille et celles à l'aval de la crête. Les pertes énergétiques liées à l'entrée et à la sortie du séparateur sont donc très faibles, conformément aux résultats de la campagne de mesures.

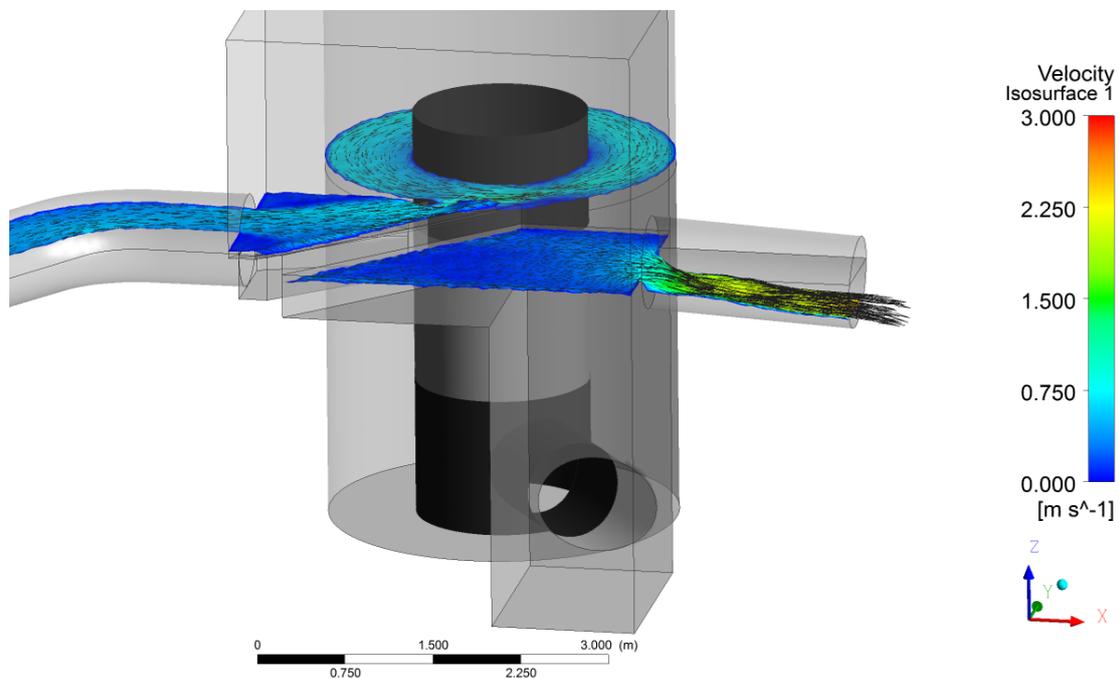


Figure 225. Surface libre de l'ouvrage de Trouville pour un débit de 200 l/s

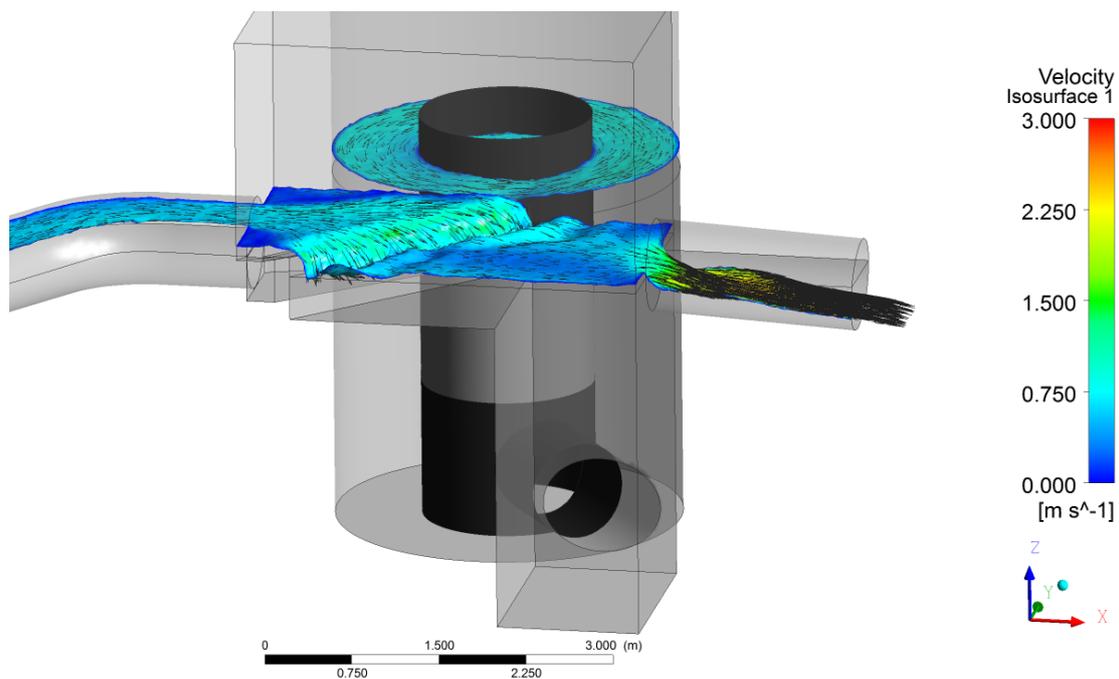


Figure 226. Surface libre de l'ouvrage de Trouville pour un débit de 300 l/s

Q (l/s)	Visualisation surface libre	Position (capteur)	Hauteur par rapport au radier d'entrée (m)
100		Amont	0.36
		Aval	0.24
		Ext. Grille	0.28
		Int. Grille	0.25
150		Amont	0.51
		Aval	0.31
		Ext. Grille	0.46
		Int. Grille	0.32
200		Amont	0.57
		Aval	0.35
		Ext. Grille	0.48
		Int. Grille	0.37
250		Amont	0.61
		Aval	0.38
		Ext. Grille	0.54
		Int. Grille	0.42
300		Amont	0.64
		Aval	0.48
		Ext. Grille	0.57
		Int. Grille	0.45

Tableau 35. Surface libre et hauteur d'eau de l'ouvrage de Trouville pour différents débits d'entrée

## 1.2 Analyse des vitesses et des débits en circulation

L'allure du champ de vitesse pour le site de Trouville est intéressante car elle permet de visualiser l'influence du débit mais également l'influence de la zone de stockage au fond du bassin. Dans le pilote expérimental, nous avons remarqué que les vitesses sont plus importantes à proximité de la grille. Ce résultat était intéressant dans la mesure où plus les vitesses tangentielles sont importantes à proximité de la grille, moins il y a de risque de colmatage. La question que l'on peut se poser concerne l'influence de la zone de stockage sur le champ de vitesse aussi bien dans le fond de l'ouvrage, qu'au niveau de la grille. Nous avons choisi d'analyser le plan "médian", c'est-à-dire le plan vertical situé à l'opposé de la conduite d'entrée dans le séparateur dans le but d'obtenir un comportement moyen. L'ensemble des résultats des différentes simulations est visible dans le *Tableau 36*.

Q (l/s)	100	150	200	250	300	
<b>Champ de vitesse tangentielle (m/s)</b>						
	$V_{\text{moyenne}}$ (m/s)	0.37	0.54	0.60	0.62	0.68
	$Q_{\text{circulation}}$ (l/s)	785	1170	1360	1410	1590

*Tableau 36. Champ de vitesse, vitesse moyenne et débit en circulation de l'ouvrage de Trouville-sur-Mer pour différents débits d'entrées*

L'analyse des profils de vitesses, pour les différents débits, permet de dégager certaines caractéristiques. Premièrement, la zone de stockage est caractérisée par des faibles vitesses, en particulier près de la paroi centrale. Ce constat est intéressant dans l'hypothèse où des faibles vitesses favoriseront la sédimentation. La partie supérieure de l'ouvrage (au niveau de la grille) est quant à elle caractérisée par des vitesses plus importantes. Là encore, le fait d'obtenir des vitesses proches de la grille est important puisque des vitesses importantes assureront un mouvement permanent des polluants à proximité de la grille.

Ce comportement hydraulique est visible dans les deux cas de figure : avec et sans déversement. On constate néanmoins une augmentation des vitesses lorsque le débit augmente. Les valeurs des vitesses à proximité de la grille sont par exemple de 0,5 m/s pour un débit de 100 l/s contre 0,8 m/s pour 300 l/s. D'autre part, en observant les vitesses moyennes en circulation, on distingue une évolution croissante du débit en circulation dans le cyclone avec le débit entrant dans l'ouvrage. Ce constat permet de confirmer le mouvement permanent de la colonne d'eau dans le séparateur quelque soit le débit injecté, et également lors de déversement.

## CONCLUSION DE LA PARTIE 6

Ce chapitre a permis d'allier les aspects technique et scientifique. Une partie technique a consisté à instrumenter l'ouvrage de Trouville-sur-Mer à l'aide d'appareils de mesures classiquement utilisés en assainissement. L'obtention des débits en entrée de l'ouvrage s'est montrée difficile en raison de l'angle entre les différents collecteurs à l'amont de l'ouvrage. Ainsi, la mesure du débit a été effectuée via une mesure de hauteur d'eau à la sortie de l'ouvrage. L'association du débit avec les hauteurs d'eau dans le CycloneSep<sup>®</sup> et le déversoir a permis de fixer le seuil de déversement de l'ouvrage ainsi que les liens entre les hauteurs d'eau et le débit. Un probable dysfonctionnement a été constaté après une période très pluvieuse. Une zone de stockage pleine, ou un colmatage de la grille, pourraient être responsables d'une suverse pour un faible débit.

Les données topographiques ont permis de reconstruire un modèle numérique de l'ensemble du site. La simulation de l'écoulement pour différents débits d'entrée a été effectuée. L'analyse des surfaces libres a montré que les résultats coïncidaient avec les données de terrain. Le seuil de déversement est proche de 200 l/s et les niveaux d'eau dans les différentes parties sont également en accords avec les observations *in situ*. La modélisation a permis d'observer l'évolution des champs de vitesse au sein de l'ouvrage. Même avec la présence d'un volume de stockage au fond du bassin, les vitesses les plus importantes se situent dans la partie supérieure et de faibles vitesses sont observées vers le fond. Ces deux constats sont intéressants car ils répondent aux objectifs fixés. Les vitesses au niveau de la grille limitent le colmatage et les faibles vitesses évitent la remise en suspension des polluants.

L'étude de terrain nous a également permis de dégager deux points importants par rapport à l'exploitation et à la maintenance de l'ouvrage. Les interventions de vidange réalisées nous ont montré la facilité et surtout la rapidité du nettoyage de l'ouvrage. D'autre part, l'instrumentation a permis de détecter un dysfonctionnement hydraulique correspondant soit à un remplissage de l'ouvrage, soit un colmatage de la grille. Par conséquent, l'installation de capteurs de niveau situés de part et d'autre du déversoir de sécurité permettrait d'informer l'exploitant sur l'état de fonctionnement hydraulique.

# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

Pour capturer les macro-déchets transitant dans les réseaux d'assainissement et éviter leur rejet vers le milieu naturel, l'installation d'une grille est une pratique courante. En revanche, ce système est très contraignant car il nécessite des interventions fréquentes pour éviter des phénomènes de colmatage. Face à la dénonciation de la pollution par les macro-déchets, une collaboration entre le laboratoire et la société Hydroconcept<sup>®</sup> a été mise en place afin de proposer des solutions pour capturer ce type de polluants tout en limitant les phénomènes de colmatage.

Ce travail de thèse a donc consisté à étudier un ouvrage de séparation particulaire utilisant la séparation solide/liquide à l'aide d'une grille en utilisant les approches numérique et expérimentale. Les principales problématiques à soulever dans cette thèse étaient à la fois techniques et scientifiques. En effet, l'installation d'une grille engendre des phénomènes physiques se répercutant à la fois à l'échelle globale (pertes de charges) ainsi qu'à l'échelle locale (phénomènes de turbulence, de gradients de vitesse et de pression). L'objectif était donc d'observer l'influence de ces phénomènes à l'échelle de la grille, ainsi qu'à l'échelle de l'ouvrage, et l'influence de ces phénomènes sur le transport solide.

L'utilisation des outils numériques 3D pour répondre à cette problématique est très intéressante mais pose problème au niveau de la discrétisation spatiale de l'ouvrage. En effet, pour modéliser les écoulements dans l'ensemble de l'ouvrage et prendre en compte les effets de la géométrie de la grille sur l'écoulement, le modèle numérique nécessite un maillage à la fois fin et volumineux. Face à ce problème, une approche multi-échelle a été développée pour permettre de modéliser les écoulements dans les ouvrages utilisant des grilles.

En utilisant les deux approches, ce travail de thèse a permis de répondre à plusieurs objectifs :

- étudier les phénomènes physiques mis en jeu à proximité de la grille ainsi que le comportement global de l'écoulement dans l'ouvrage
- étudier les interactions entre ces phénomènes physiques et la trajectoire des polluants à proximité de la grille et dans l'ouvrage
- développer une méthode numérique multi-échelle permettant de simuler les écoulements à proximité d'une grille et dans l'ouvrage
- utiliser la méthode multi-échelle pour optimiser le fonctionnement de l'ouvrage
- observer l'efficacité d'un ouvrage grandeur nature

### **Etude expérimentale**

Pour mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu et dans l'optique de valider la méthode numérique développée dans cette thèse, un pilote expérimental a été construit. Cet ouvrage circulaire d'environ 2500 litres est équipé par de nombreux instruments : un vélocimètre ADV capable de mesurer les vitesses et les phénomènes de turbulence, des sondes ultrasons pour mesurer la surface libre, un système d'acquisition et automatisé des pompes et des débitmètres électromagnétiques.

La modularité de la partie centrale du pilote a permis de tester différents types de grille. Ainsi, nous avons pu mesurer l'influence de la grille sur l'écoulement global (champ de vitesse, perte de charge, ...) mais aussi observer les phénomènes physiques propres à chaque grille (vitesse et turbulence). Les résultats obtenus ont montré la faible influence de la grille sur le comportement hydraulique global. En revanche, les mesures à proximité immédiate de la grille ont mis en évidence l'influence de l'inclinaison du métal déployé en favorisant la production d'énergie cinétique turbulente à l'amont de la grille.

Concernant le transport solide, plusieurs expériences ont été réalisées. L'utilisation de macro-déchets a permis de visualiser la trajectoire de ce type de polluant et d'observer l'aptitude de l'ouvrage face au colmatage. Les vitesses importantes à proximité de la grille permettent d'assurer la circulation des déchets autour de la grille sans la colmater. D'autre part, des tests de colmatage ont permis de démontrer que les grilles de type métal déployé permettaient de limiter le colmatage par rapport à des grilles classiques. Nous avons également testé l'ouvrage face à la rétention des particules. Les processus de sédimentation ont pu être appréciés pour les particules les plus lourdes. Les particules de faible masse volumique, pilotées par l'hydrodynamique, sont contraintes de traverser la grille.

### **Modélisation numérique 3D**

La première partie de ce travail de modélisation a été de développer une stratégie multi-échelle permettant de simuler l'écoulement dans l'ouvrage et de visualiser les phénomènes physiques à proximité de la grille. Cette approche, qui consiste à séparer les deux échelles spatiales, a nécessité la construction de deux modèles. Un modèle monophasique représentant une portion de grille a permis d'étudier les phénomènes hydrodynamiques à proximité des orifices. Ce modèle est également utilisé pour déterminer les pertes de charge permettant de caler la grille conceptuelle dans le modèle global. En effet, face à la problématique liée à la discrétisation de l'ouvrage, nous avons utilisé une approche conceptuelle de grille pour modéliser l'écoulement dans l'ouvrage. Cette approche consiste à remplacer la grille réelle par un milieu poreux dans l'objectif de diminuer le nombre de mailles et le temps de calcul. L'utilisation d'un milieu poreux se justifie par la capacité des milieux poreux à reproduire l'influence des grilles, visible à l'échelle globale, sur un écoulement. Les conséquences visibles à l'échelle globale sont principalement les pertes de charge et le sens de l'écoulement. Si le premier est reproduit au sein du milieu poreux par l'ajout d'un terme source, le sens de l'écoulement n'a pas pu être pris en considération avec notre code de calcul.

Concernant le transport solide, notre choix s'est porté sur l'utilisation d'une approche euléro-lagrangienne. Cette technique a été utilisée et validée à plusieurs reprises sur des ouvrages en assainissement. En revanche, cette méthode pose quelques difficultés dans le cadre de la stratégie multi-échelle. La grille, étant modélisée par un milieu poreux, ne pourra pas reproduire les effets de contact entre la grille et les particules. L'approche lagrangienne a tout de même été utilisée pour observer les trajectoires des particules et leur capacité à sédimenter dans l'ouvrage. D'autre part, le modèle local a été utilisé pour mettre en avant l'influence des phénomènes physiques provoqués par la grille sur les trajectoires des particules.

### **Validation de la méthode et confrontation des deux approches**

La confrontation entre les données expérimentales du pilote et les résultats de l'approche numérique a permis de valider la méthode multi-échelle.

L'utilisation d'une portion de grille pour étudier les phénomènes locaux a été validée en confrontant les pertes de charge obtenues à partir des deux approches. Ce modèle a permis d'observer de nombreux phénomènes difficilement décelables via l'expérimentation. La visualisation des résultats a démontré la présence de nombreux phénomènes physiques provoqués par la grille : sens de l'écoulement, zones de recirculations dans l'entrefer, gradient de pressions à l'extrémité des bandelettes, zones de faibles pressions dans l'entrefer, taux d'énergie cinétique turbulente important à l'extrémité des bandelettes de métal,... D'autre part, l'utilisation d'un modèle de turbulence anisotrope semble indispensable pour

modéliser tous ces phénomènes. Cependant, la comparaison des résultats entre un modèle *RSM* et une approche *LES* a montré des différences importantes dans l'entrefer. D'autre part, l'étude des phénomènes instationnaires a montré la nécessité d'intégrer de la turbulence dans le modèle lors d'une approche *LES*.

Concernant le comportement global de l'ouvrage, la technique d'homogénéisation de la grille a montré une différence d'environ 20% sur les champs de vitesse à proximité de la grille. En revanche, la différence relative obtenue sur les variables globales comme par exemple les vitesses moyennes ou les débits en circulation est d'environ 3 %. Par conséquent, cette technique est très adaptée pour étudier le comportement global de l'ouvrage, même si elle ne permet pas de conclure de façon précise sur les champs de vitesse à proximité de la grille. Par ailleurs, l'analyse de sensibilité au modèle de turbulence a montré des profils non-cohérents en utilisant un modèle isotrope de type  $k-\varepsilon$  ou  $k-\varepsilon$  *RNG*. Seul un modèle *RSM* permet de reproduire le bon gradient de vitesse permettant d'obtenir des vitesses plus importantes à proximité de la grille.

La validation des écoulements dans les deux modèles a permis d'appliquer une approche lagrangienne dans l'objectif de visualiser la trajectoire des particules à proximité de la grille, ainsi que leur comportement dans l'ouvrage. En utilisant le modèle local, nous avons remarqué que l'efficacité de séparation dépend à la fois des caractéristiques des particules et des phénomènes physiques produits par la grille. En effet, les particules lourdes n'arrivent pas à contourner le métal en raison de leur importante inertie. D'autre part, nous avons observé la tendance des particules à être éjectées de la zone coïncidant à un fort taux d'énergie cinétique turbulente et au gradient de pression important. A l'échelle de l'ouvrage, nous avons remarqué l'influence des caractéristiques des particules sur les processus de sédimentation.

### **Utilisation des modèles pour optimiser le fonctionnement des ouvrages**

La validation de la méthode numérique permet d'appliquer la méthode pour tester différentes configurations dans l'objectif d'améliorer l'efficacité de l'ouvrage. Cette efficacité étant jugée sur la capacité à éviter le colmatage, nous sommes partis de l'hypothèse qu'il fallait chercher à augmenter les vitesses à proximité de la grille pour assurer une constante rotation des déchets. L'utilisation du modèle à l'échelle de l'ouvrage a permis de tester différents aménagements pour accentuer les vitesses. Les résultats obtenus ont montré que l'installation d'une plaque horizontale sous la grille permettait d'obtenir un champ de vitesse important proche de la grille mais également des vitesses faibles sous la plaque, diminuant ainsi les risques de remise en suspension des polluants.

Un autre aspect permettant d'augmenter l'efficacité est la forme de la grille. Dans ce contexte, le modèle a permis de tester différents types de grilles afin d'observer les différents phénomènes

physiques produits par leurs formes. Les résultats ont mis en évidence la performance des grilles de type métal déployé pour accentuer les phénomènes physiques à proximité des orifices. De plus, l'application d'une approche lagrangienne pour les différents cas testés a mis en avant la capacité des grilles à métal déployé à retenir plus de particules que les plaques perforées.

### **Etude d'un ouvrage réel**

Un des objectifs de ce travail de thèse était d'observer et de simuler le fonctionnement hydraulique d'un ouvrage grandeur nature. L'instrumentation du séparateur de Trouville-sur-Mer a permis d'assurer le suivi hydraulique pour une période d'environ 7 mois. De plus, les données topographiques ont servi à reconstruire un modèle 3D en utilisant la procédure développée dans le cadre de la thèse. Les résultats obtenus à partir des deux approches ont permis de visualiser le comportement d'un ouvrage de terrain avec et sans fonctionnement de la surverse. L'ouvrage de Trouville-sur-Mer a également permis de vérifier l'aptitude du séparateur à retenir des macro-déchets et des sédiments. D'autre part, les interventions ont montré la facilité d'exploitation et de vidange de l'ouvrage ainsi que les techniques envisagées permettant d'évaluer le remplissage de la zone de stockage.

## Perspectives

Au niveau des perspectives, on peut noter certains points qui mériteraient d'être étudiés.

Au niveau de la modélisation numérique, l'approche multi-échelle peut encore être améliorée. L'utilisation d'un code de calcul comme *OpenFoam* pourrait être utilisée pour essayer de reproduire l'orientation de l'écoulement au sein du milieu poreux. Ce code de calcul a l'avantage d'être « libre » et permet d'accéder et modifier les lignes de commande du code. Nous avons également observé les limites du modèle global au niveau de la reproduction des différences de hauteurs entre l'extérieur et l'intérieur de la grille. Des recherches plus poussées pourraient être réalisées pour essayer de mieux répartir les pertes de charges, à savoir plus de pertes d'énergie cinétique et moins de pertes sous forme potentielle. Par rapport au modèle local, l'utilisation d'une approche *LES* est très intéressante pour observer les phénomènes physiques au sein des orifices. En revanche, elle nécessite la prise en compte de la turbulence de l'écoulement en entrée si l'on souhaite reproduire des fluctuations de vitesses et de pression comparables à l'expérience.

De plus, l'étude en régime non-permanent n'a pas été abordée dans le cadre de cette thèse. Par conséquent, des simulations mériteraient d'être effectuées pour visualiser le comportement hydraulique en faisant varier les débits d'entrée. De plus, l'évolution de l'écoulement au cours du temps provoquera un changement au niveau du transport solide (comme par exemple avec l'étude du colmatage et la simulation d'une reprise de pluie).

D'un point de vue de l'expérimentation en laboratoire, plusieurs améliorations sont possibles. L'installation d'une sortie siphonide permettrait de tester l'ouvrage en régime non-permanent. En effet, en raison de la condition de sortie actuellement en place, il n'est pas possible de faire varier le débit au cours du temps sans modifier l'ouverture de la vanne à l'aval. Concernant le transport solide, plusieurs campagnes expérimentales peuvent encore être effectuées en testant notamment d'autres particules.

Par rapport à la grille, plusieurs contraintes n'ont pas permis d'utiliser la *PIV*. Face à l'importance des phénomènes observés sur une grille de type métal déployé et les différences par rapport aux plaques perforées, une étude expérimentale plus poussée sur les phénomènes physiques locaux provoqués par la grille mériterait d'être réalisée par exemple au sein d'un canal.

# BIBLIOGRAPHIE

---

Ab Ghani, A., Azamathulla, H., Liang, L., and Ravikanth, C., *Flow pattern and hydraulic performance of the REDAC Gross Pollutant Trap*. Flow Measurement and Instrumentation, 2011. 22: p. 215-224.

Adamsson, A., Bergdahl, L., and Lyngfelt, S., *Measurement and three-dimensional simulation of flow in a rectangular detention tank*. Urban Water Journal, 2005. 2(4): p. 277-287.

Anastasopoulou, A., Mytilineou, C., Smith, C., and Papadopoulou, K., *Plastic debris ingested by deep-water fish of the Ionian Sea (Eastern Mediterranean)*. Deep-Sea Research I, 2013. 74: p. 11-13.

Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., and Wachem, B., *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. 2012: Cambridge University.

Andoh, T.Y.G. and Saul, A.J., *The use of hydrodynamic vortex separators and screening systems to improve water quality*. Water Science and Technology, 2003. 47: p. 8.

Andoh, R., Hides, S., and Saul, A.J., *Improving water quality using hydrodynamic vortex separator and screening systems*, in *9th International Conference on Urban Drainage*. 2002: Portland, USA.

Ansys Fluent, *Release notes v14*. 2012. Ansys Inc., Canonsburg, USA.

Ashley, R., Bertrand-Krajewski, J., Hvitved-Jacobsen, T., and Verbanck, M., *Solids in sewers: characteristics, effects and control of sewer solids and associated pollutants*. 2004: IWA.

Azzi, A., *Initiation à la simulation des grandes échelles de la turbulence*. 2005, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.

Baines, W. and Peterson, E., *An investigation of flow through screens*. Trans ASME, 1951. 73: p. 467-480.

Birch, G. and Matthai, C., *Efficiency of a continuous deflective separation (CDS) unit in removing contaminants from urban stormwater*. Urban Water Journal, 2009. 6(4): p. 313-321.

Blanc, P., *Etude expérimentale du champ de vitesse et modélisation du transport dissout d'un canal à surface libre*, ENGEES. 2004: Strasbourg.

Blazy, P., Jdid, E.-A., and Bersillon, J.-L., *Décantation : Aspects théoriques*. Techniques de l'ingénieur, 1999. J 3450-1:10.

Bourrier, R., Satin, M., and Selmi, B., *Guide technique de l'assainissement : collecte, épuration, conception, exploitation*. 4e Edition, ed. Le Moniteur. 2012.

Boitelle, F., *La Seine malade de ses déchets*, Paris-Normandie, éditions du 03/09/2013, 2013.

Brennen, C., *Fundamentals of multiphase flow*, Cambridge University Press. 1st Ed. 2005, New York. 1-29.

- Brizzi, R., *Homogénéisation, Aspects Numériques*. CMAP, Ecole Polytechnique, Palaiseau. 2009
- Burgoni, L., Krause, L., and Petry, M., *Marine Debris and Human Impacts on Sea Turtles in Southern Brazil* Marine Pollution Bulletin, 2001. 42: p. 5.
- Camnasio, E., Erpicum, S., Orsi, E., Piroton, M., Schleiss, A.J. and Benjamin Dewals, *Coupling between flow and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs*, Journal of Hydraulic Research, 2013, 1-13
- Chandesris, M., *Modélisation des écoulements turbulents dans les milieux poreux et à l'interface avec un milieu libre*. 2006, Université de Paris 6.
- Chassaing, P., *Turbulence en mécanique des fluides : Analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur*, ed. Cépaduès. 2000.
- Chatellier, L., Wang, R., David, L., Courret, D., and Larinier, M., *Hydrodynamique de prises d'eau munies de plans de grilles orientés*, in *12èmes journées de l'hydrodynamique*. 2010: Nantes, France.
- Chebbo, G., *Solides des rejets pluviaux urbains, caractérisation et traitabilité*. 1992. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- Chebbo, G. and A, B., *Caractérisation physico-chimique des solides des rejets urbains par temps de pluie*. Techniques Sciences et Methodes, 1993. 10 : 524-528.
- Chocat, B., Bertrand-Krajewsky, J.-L., and Barraud, S., *Eaux pluviales urbaines et rejets urbains par temps de pluie*. Techniques de l'ingénieur, 2007. W 6 800:1-17.
- Collignon, A., Hecq, J.H., Glagani, F., Voisin, P., Collard, F., and Goffart, A., *Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea*. Marine Pollution Bulletin, 2012. 64(4): p. 861-864.
- Cooper, D. and Corcoran, P., *Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii* Marine Pollution Bulletin, 2010. 60: p. 5.
- DCSMM. *Directive 2008/56/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive cadre stratégie pour le milieu marin)*. 2008
- Derraik, J., *The pollution of the marine environment by plastic debris: a review* Marine Pollution Bulletin, 2002. 44: p. 8.
- Dewals, B., Kantoush, S., Erpicum, S., Piroton, M., and Schleiss, A., *Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins*. Environmental Fluid Mechanics, 2008. 8:31-54.
- Dufresne, M., *La modélisation 3D du transport solide dans les bassins en assainissement: du pilote expérimental à l'ouvrage réel*. 2008, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur: Strasbourg. p. 225.
- Dufresne, M., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A., and Poulet, J.-B., *Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank*. Computers & Fluids, 2009. 38.

Dufresne, M., Dewals, B.J., Erpicum, S.b., Archambeau, P., and Piroton, M., *Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs*. Journal of Hydraulic Research, 2010. 48(2): p. 7.

E, W., Engquist, B., Li, X., Ren, W., and Vanden-Eijnden, E., *Heterogeneous multiscale methods: a review*. Computational Physics, 2007. 2(3): p. 367-450.

Egarr, D., Faram, M., O'Doherty, T., and Syred, N., *An investigation into the factors that determine the efficiency of a hydrodynamic vortex separator*, in *Novatech*. 2004.

Elgobashi, S., *Particle laden turbulent flows: direct simulation and closure models*. Appl. Sci. Res., 1991. 48: p. 2638-2645.

Elsayed, K. and Lacor, C., *The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance*. Applied Mathematical Modelling, 2011. 35.

Elsayed, K. and Lacor, C., *Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters*. Computers & Fluids, 2011. 51.

Elsayed, K. and Lacor, C., *The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES*. Computers & Fluids, 2013. 71.

Endress Hauser, Fiche d'étalonnage des débitmètres électromagnétiques. 2006

ERCOFTAC, Quality and Trust in Industrial CFD, Best Practice Guidelines. Editors Casey, M. and Wintergertse T., Fluid Dynamics Laboratory, Sulzer Innotec. 2000

Faram, M., Iwugo, K., and Andoh, R., *A field study of sediments captured by flow-through stormwater interceptors, 6e conference internationale Novatech*. 2007: Lyon, France.

Faram, M.G. and Harwood, R., *A method for the numerical assessment of sediment interceptors*. Water Science and Technology, 2003. 47(4): p. 7.

Flack, K., Schultz, M., and Shapiro, T., *Experimental support for Townsend's Reynolds number similarity hypothesis on rough walls*. Phys. Fluids, 2005. 17(035102).

Forchheimer, P., *Wasserbewegung durch Boden*. Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, 1901. 45: p. 1179-1184.

France Télévisions, Envoyé Spécial, reportage "La méditerranée, une mer de plastique". Diffusé en 2010 (<http://www.youtube.com/watch?v=2Qr5hP7IoOY>)

Fuchs, S., Mayer, I., Haller, B., and Roth, H., *Lamella Settler for Storm Water Treatment - Performance and Design Recommendations*, in *8e conference international Novatech*. 2013: Lyon.

GESAMP, *The state of the marine environment*, ed. B.S. Publications. 1991, London. 146.

Gonzalez-Marchand, G., *Amélioration des connaissances sur le colmatage des systèmes d'infiltration d'eaux pluviales*. 2012, INSA de Lyon.

Goring, D. and Nikora, V., *Despiking acoustic Doppler velocimeter data*. Journal of Hydraulic Engineering, 2002. 117.

Grenelle de la Mer, Fonds macro-déchets, groupe 14. 2010

Gromaire-Mertz, M., *La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire: caractéristiques et origines*. 1998, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Gromaire-Mertz, M., *Contribution à l'étude des sources et flux de contaminants dans les eaux pluviales urbaines*, Université Paris-Est. 2012.

Hache, H., *Dépollution des eaux pluviales : quels dispositifs pour une stratégie optimisée?* 2000, IUP EGID - Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3.

Hager, W.H., *Wastewater hydraulics - Theory and practice*. Springer. 1999

Hannouche, A., *Analyse du transport solide en réseau d'assainissement unitaire par temps de pluie : exploitation de données acquises par les observatoires français en hydrologie urbaine*. 2012, Laboratoire eau environnement systèmes urbains.

Hirt, C. and Nichols, B., *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*. Journal of Computational Physics, 1981. 39: p. 201-225.

Houot, R. and Joussemet, R., *Classification hydraulique en dimensions*. Techniques de l'ingénieur, 1996. J3 130: p. 24.

Idel'cik, *Memento des pertes de charge*, ed. Heyrolles. 1986.

IJINUS, *Capteur/Concentrateur/Enregistreur*, 2011.

Isel, S., Dufresne, M., Bardiaux, J., Fischer, M., and Vazquez, J., *Computational fluid dynamics based assessment of discharge-water depth relationships for combined sewer overflows*. Urban Water Journal, 2013.

Jago, R., *Trials of a new rapid clarification process*, in *66th Annual Water Industry Engineers and Operators Conference*. 2003: Eastbank Center - Shepparton.

Jamet, D., *L'approche multi-échelle et la simulation numérique directe des écoulements diphasiques*, in *INSTN, Écoulements et transferts de chaleur diphasiques dans les réacteurs nucléaires*, 26-30 Nov. 2007. 2007: CEA/Grenoble, DEN/DER/SSTH.

Jarman, D.S., Faram, M.G., Butler, D., Tabor, G., Stovin, V.R., Burt, D., and Throp, E., *Computational fluid dynamics as a tool for urban drainage system analysis: A review of applications and best practice*, in *11th International Conference on Urban Drainage*. 2008: Edinburgh, Scotland.

Jayanti, S. and Narayanan, S., *Computational study of particle-eddy interaction in sedimentation tanks*. Journal of Environmental Engineering, 2004. 130(1) 37-49.

Kantoush, S., DeCesare, G., Boillat, J., and Schleiss, A., *Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling*. Flow Measurement and Instrumentation, 2008. 19:139-144.

Kwon, K., Kim, S., Kim, L., Lee, S., and Min, K., *Particle removal properties of stormwater runoff with a lab-scale vortex separator*. Desalination and Water Treatment, 2012. 38(1-3): p. 301-305.

Lamprea, M., *Caractérisation et origine des métaux traces, hydrocarbures aromatiques polycycliques et pesticides transportés par les retombées atmosphériques et les eaux de ruissellement dans les bassins versants séparatifs péri-urbains*. . 2009, Ecole Centrale de Nantes.

- Laws, E.M. and Livesey, J.L., *Flow through screens*. Ann.Rev. Fluid. Mech, 1978. 10.
- Lazar, B. and Gracan, R., *Ingestion of marine debris by loggerhead sea turtles, Caretta caretta, in the Adriatic Sea* Marine Pollution Bulletin, 2011.
- Leclaire, C., *Etude du fonctionnement d'un bassin de pollution en tête d'une station d'épuration, propositions de gestion*. 1997, Ecole Nationale du Genie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.
- Lee, J., Yang, H., and Lee, D., *Effect of the cylinder shape of a long-coned cyclone on the stable flow-field establishment*. Powder Technology, 2006. 165: p. 30-36.
- Lee, J., Wang, K., Choi, C., and Lim, H., *CFD modelling of flow field and particle tracking in a hydrodynamic stormwater separator*. Water Science and Technology, 2010. 62.10.
- Lipeme Kouyi, G., Vazquez, J., and Poulet, J.-B., *3D surface measurement and numerical modelling in storm overflows*. Flow Measurement and Instrumentation, 2003. 14: p. 79-87.
- Lipeme Kouyi, G., *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage*. 2004, Université Louis Pasteur: Strasbourg. p. 274.
- Lipeme Kouyi, G., Arias, L., Barraud, S., and Bertrand-Krajewski, J., *CFD Modelling of flows in a large stormwater detention and settling basin*, in *7e Conférence Internationale Novatech*. 2010: Lyon, France.
- Madhani, J., Kelson, N., and Brown, R., *An experimental and theoretical investigation of flow in a gross pollutant trap*. Water Science and Technology, 2009. 59(6): p. 1117-1127.
- Madhani, J. and Brown, R. *A literature review on research methodologies of gross pollutant traps*. in *The proceedings of the first international postgraduate conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing*. 2011. Queensland University of Technology, Brisbane.
- Maxey, M. and Riley, J., *Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow*. Physics of Fluids, 1983. 26(4): p. 1158-1174.
- Mendez, S., *Simulation numérique et modélisation de l'écoulement autour des parois multi-perforées*, in *Ecole doctorale: I2S*. 2007, Université de Montpellier 2: Montpellier.
- Meusburger, H., Volkart, P., and Minor, H., *A new improved formula for calculating thrashrack losses*, in *XXIX IAHR Congress*. 2001: Beijing.
- Microsonic. 2012, page internet: <http://www.microsonic.de/fr/Products/zws/STANDARD-SENSORS/zws-24CDQS.htm>
- Milicic, V. and Chebbo, G., *Numerical tools for sediment management in sewers: application to storage-settling basins*., in *Proceedings of the 7th IAHS*. 2005: Foz do Iguaçu, Brazil.
- Morét-Ferguson, S., Law, K.L., Proskurowski, G., Murphy, E.K., Peacock, E.E., and Reddy, C.M., *The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean* Marine Pollution Bulletin, 2010. 60: p. 6.

Morin, A., Milisic, V., and Figue, J., *Simulation numériques des écoulements dans un décanteur lamellaire à contre-courant*. TSM, 2009. 11.

Morin, A., Milisic, V., and Figue, J.-F., *Simulations numériques de champs de concentrations des particules dans un décanteur lamellaire à contre-courant*. Techniques Sciences et Methodes, 2012. 9.

Nascimento, N., Ellis, J., Baptista, M., and Deutsch, J., *Using detention basins: operational experience and lessons*. Urban Water, 1999. 1: p. 113-124.

Nicoud, F. and Durcos, F., *Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient*. Flow, Turb and Combustion, 1999. 62(3): p. 183-200.

NIVUS Gmbh, *Instruction Manual for PCM3 Measurement Device*. 2003

Noode Farahani, S.M., Tahmasbi, V., Safikhani, H., and Abbassi, A., *Effects of using ribs on flow pattern and performance of cyclone separators*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2011. 5(2): p. 7.

Nowakowski, A., Cullivan, J., Williams, R., and Dyakowski, T., *Application of CFD to modelling of the flow in hydrocyclones. Is this a realizable option or still a research challenge?* Minerals Engineering, 2004. 17: p. 661-669.

Ohlmann, D., *Calcul des incertitudes de mesure*. Cours de Métrologie, IUT Louis Pasteur de Schiltigheim. 2006.

Oliveira, D.C., Almeida, C.A.K., Vieira, L.G.M., Damasceno, J.J.R., and Barrozo, M.A.S., *Influence of geometric dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: an experimental and CFD study*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2009. 26(3): p. 7.

OSPAR, site internet de l'organisation, [consulté le 10/10/2013], lien internet : [http://www.ospar.org/content/content.asp?menu=30340108070000\\_000000\\_000000](http://www.ospar.org/content/content.asp?menu=30340108070000_000000_000000)

Pernès, P., *Hydraulique unidimensionnelle : Partie 1 et 2*, Cemagref Editions. 2004.

Quarini, G., Innes, H., Smith, M., and Wise, D. *Hydrodynamic modelling of sedimentation tanks*. in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E, Journal of Process Mechanical Engineering*. 1996.

Pathapati, S.S. and Sansalone, J.J., *CFD Modeling of a Storm-Water Hydrodynamic Separator*. Journal of Environmental Engineering, 2009. 135(4).

Pathapati, S.S. and Sansalone, J.J., *Can a Stepwise Steady Flow Computational Fluid Dynamics Model Reproduce Unsteady Particulate Matter Separation for Common Unit Operations?* Environ. Sci. Technol., 2011. 45: p. 8.

Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M., and Ebrahimi, R., *Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder*. Chemical Engineering and Processing, 2008. 47: p. 9.

Roache, P., *Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies*. Journal of Fluid Engineering, 1994. 116: p. 405-413.

Santiago, C.R.C., *Study of the Head Loss Associated with a Fluid Flowing through a Porous Screen*, in *Department of Civil and Environmental Engineering*. 2007, University of Houston

- Schultz, M. and Flack, K., *The rough-wall turbulent boundary layer from the hydraulically smooth to the fully rough regime*. Journal of fluid Mechanics, 2007. 580: p. 381-405.
- Schwarz, T. and Wells, S., *Continuous deflection separation of stormwater particulates*. Advances in Filtration and Separation Technology, 1999. 12.
- Shalaby, H., Wozniak, K., and Wozniak, G., *Numerical calculation of particle-laden cyclone separator flow using LES*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2008. 2(4): p. 382-392.
- Shukla, S.K., Shukla, P., and Ghosh, P., *Evaluation of numerical schemes for dispersed phase modeling of cyclone separators*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2011. 5(2): p. 11.
- Sontek, *Sontek ADVfield acoustic Doppler velocimeter: technical documentation*. SonTek/YSI Inc. 2001.
- Stovin, V. and Saul, A.J., *Efficiency prediction for storage chambers using computational fluid dynamics*. Water Science and Technology, 1996. 33(9): p. 163-170.
- Stovin, V. and Saul, A.J., *A computational fluid dynamics (CFD) particle tracking approach to efficiency prediction* Water Science and Technology, 1998. 37(1): p. 285-293.
- Strom, K., Chamberlain, A., and Kumar, R. *Vectrino Turbulence Measurement with a 3D/2D Side-looking Probe*. in *Presentation of Nortek Users Conference*. 2008. Vicksburg, MS
- Torres, A., *Décantation des eaux pluviales dans un ouvrage réel de grande taille : éléments de réflexion pour le suivi et la modélisation*. 2008, Thèse de doctorat, INSA Lyon.
- Tyack, J.N. and Fenner, R.A., *Computational fluid dynamics modelling of velocity profiles within a hydrodynamic separator* Water Science and Technology, 1999. 39: p. 8.
- UFT. Techniques des Fluides et de l'Environnement. Fiche Descriptive du séparateur vortex FluidSep. WA 0233 F. 2013
- USEPA. Office of Water and US Environmental Protection Agency. *Stormwater Technology fact sheet hydrodynamic separator*.1999
- Vazquez, J., Morin, A., Dufresne, M., and Wertel, J., *A CFD approach for shape optimization of lamellar settlers*, in *7e Conférence Internationale Novatech*. 2010: Lyon, France.
- Vectrino, *Vectrino Velocimeter, User Guide*. Nortek AS, Norway. 2009.
- Venkataraman, P. and Rama Mohan Roe, P., *Darcian, transitional and turbulent flow through porous media*. Journal of Hydraulic Engineering, 148(8). p840-846.1998
- Versteeg, H. and Malalasekara, W., *An introduction to Computational Fluid Dynamics*, ed. Prentice Hall. 1995.
- Vosswinkel, N., Lipeme Kouyi, G., Ebbert, S., Schnieders, A., Maus, C., Laily, A., Mohn, R., and Uhl, M., *Influence of unsteady behaviour on the settling of solids in storm water tanks*, in *9th International Conference on Urban Drainage Modelling 2012*: Belgrade Serbia.

Wong, T.H., Wootom, R.M., and Fabian, D., *A solid separator using a continuous deflective system*, in *International Conference on Urban Stormwater Drainage*. 1996: Hannover Germany.

Yan, H., Lipeme Kouyi, G., and Bertrand-Krajewski, J., *3D modeling of flow, solid transport and settling processes in a large stormwater detention basin*, in *12th International Conference on Urban Drainage*. 2011: Porto Alegre Brazil.

Yeh, H. and Shrestha, M., *Free-surface flow through screen*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989. 115(10): p. 1371-1385.



# ANNEXES

---

## ANNEXE A : REPETABILITE ET REPRODUCTIBILITE DES MESURES

Ces deux tests métrologiques ont pour but de vérifier la répétabilité des mesures dans des conditions similaires et la reproductibilité en faisant varier certains paramètres.

### 1. TEST DE REPRODUCTIBILITE

Par définition, la reproductibilité désigne l'écart de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie). En d'autres termes, ce test consiste à vérifier la bonne reproductibilité des mesures en faisant varier certaines conditions (principe de mesure, méthode de mesure, instrument de mesure, lieu, temps,...)

Dans notre cas, nous avons comparé les résultats obtenus avec les deux capteurs de vitesse (ADV Sontek et ADV Nortek en position side-looking). Ainsi, nous testerons l'influence de l'instrument mais aussi l'influence du temps. En effet, environ 1 année sépare les deux protocoles de mesures. De plus, ce test permet de mettre en évidence l'influence de l'arrêt des vannes et des pompes.

Le protocole consiste à mettre en place le capteur de façon à ce qu'il mesure le champ de vitesse à 9,5 cm de la grille pour  $z = 0,38$  m et  $\Theta = 180^\circ$ . La durée d'acquisition est fixée à 30 secondes de manière à obtenir des grandeurs suffisantes pour s'affranchir de l'effet de taille de l'échantillon.

Les résultats des composantes moyennes sont donnés dans le tableau ci-dessous.

	U (m/s)	V (m/s)	W (m/s)
<i>ADV Sontek</i>	0,7359	0,0769	0,0132
<i>ADV Nortek</i>	0,7487	0,0712	-0,0820

*Tableau 37. Résultats des vitesses moyennes pour le test de reproductibilité*

En tenant compte des incertitudes, respectivement 1% et 0,5 % de la mesure pour l'ADV Sontek et l'ADV Nortek, on peut observer des valeurs identiques pour la vitesse tangentielle U. Illustré sur les graphiques suivants, on remarque cependant de moins bon résultats pour la vitesse radiale V et la composante vertical W. Ces différences peuvent s'expliquer par l'orientation de la tête du capteur : en position down-looking, le capteur peut influencer la composante verticale, et en position side-looking, il peut influencer la composante radiale.

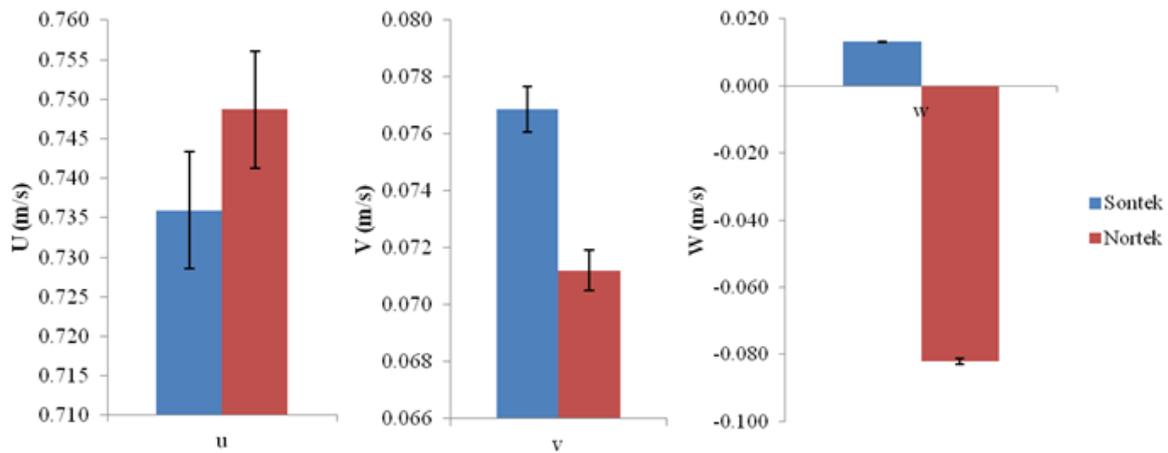


Figure 227. Représentation des résultats du test de reproductibilité

## 2. TEST DE REPETABILITE

Par définition, la répétabilité est l'étroitesse entre les résultats de mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués avec l'application de la totalité des mêmes conditions de mesure (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie). En d'autres termes, les conditions de répétabilité comprennent un même mode opératoire, un même observateur, un même instrument de mesure, un même lieu et une répétition durant une courte période.

Pour ce test, nous avons réalisé une succession de 8 mesurages avec l'ADV Nortek en position side-looking. Le *Tableau 38* permet d'observer les moyennes et les écarts-types obtenus. Ces deux grandeurs sont souvent appliquées pour évaluer l'incertitude (incertitude de « type A ») lors de tests de répétabilité (Ohlmann, 2006).

Echantillon	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vz (m/s)
1	0.7324	0.0631	0.0686
2	0.735	0.0588	0.0658
3	0.7341	0.0586	0.0651
4	0.7395	0.0612	0.0671
5	0.7337	0.0611	0.069
6	0.7335	0.0608	0.0642
7	0.7339	0.0597	0.0637
8	0.7342	0.0608	0.0741
Moyenne	0.7345	0.0605	0.0672
Ecart type	0.0020	0.0014	0.0032
Ecart type relatif	0.3%	2.3%	4.7%

Tableau 38. Résultats du test de répétabilité

Ce tableau permet de montrer la très bonne répétabilité des mesures pour la vitesse tangentielle. L'écart-type relatif est inférieure à l'incertitude du capteur. En revanche, pour la vitesse radiale et la vitesse verticale, l'erreur est respectivement de 2,3 et 4,7 %. L'erreur, inférieure à 5%, peut être considéré comme acceptable.

# ANNEXE B : MODELISATION NUMERIQUE 3D

## 1. MODELISATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS

Les équations de Navier-Stokes, issues de la seconde loi de Newton et l'équation de continuité, sont utilisées pour modéliser le mouvement d'un fluide newtonien. Ces équations sont issues des lois classiques de conservation de la masse et de la quantité de mouvement:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = \frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}[\mu \overrightarrow{\text{grad}}(u)] \quad (34)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = \frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}[\mu \overrightarrow{\text{grad}}(v)] \quad (35)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = \frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}[\mu \overrightarrow{\text{grad}}(w)] + g \quad (36)$$

avec  $\rho$  la masse volumique,  $\vec{u} = (u, v, w)$  le vecteur de vitesse instantanée,  $p$  la pression instantanée,  $\mu$  la viscosité dynamique et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

La principale difficulté dans la modélisation des écoulements est de prendre en compte les phénomènes de turbulence, souvent rencontrés en assainissement. Cette turbulence se caractérise par des fluctuations incessantes des vitesses et de la pression autour de leurs valeurs moyennes.

Ces écoulements sont caractérisés par des nombres de Reynolds important, calculés à partir de :

$$\text{Re} = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (37)$$

avec  $\rho$  la masse volumique,  $U$  une vitesse caractéristique,  $\mu$  la viscosité dynamique et  $L$  une longueur caractéristique de l'écoulement.

Pour de faibles nombres de Reynolds, l'écoulement est dit laminaire. Physiquement, un tel écoulement est caractérisé par des vitesses et des pressions constantes dans le temps. Dans ce cas, les équations (33) à (36) sont suffisantes pour modéliser l'écoulement.

Pour des Reynolds importants, l'écoulement est turbulent. Physiquement, ces écoulements sont caractérisés par des fluctuations de vitesses et de pression non stationnaires, aléatoires et chaotiques.

## 1.1 Les différentes approches (DNS, LES, RANS)

### La simulation numérique directe (DNS)

La résolution numérique directe des équations de Navier-Stokes (DNS) est l'approche la plus complète pour modéliser un écoulement turbulent. Elle consiste à résoudre directement les équations de Navier-Stokes pour les variables instantanées. Cependant, cette méthode nécessite des moyens informatiques extrêmement puissants. La discrétisation spatiale doit être très fine afin de modéliser les plus petits tourbillons sur l'ensemble du domaine. De plus, une discrétisation temporelle fine est également exigée pour prendre en compte l'ensemble des phénomènes instationnaires.

Les simulations réalisées en DNS sont généralement effectuées sur des petits domaines à des Reynolds modérés. En assainissement, les ouvrages étant généralement de l'ordre du mètre et les écoulements fortement turbulents, d'autres techniques de modélisation doivent être mises en œuvre.

### La simulation des grandes échelles (LES)

L'approche utilisée pour modéliser les écoulements turbulents instationnaires à Reynolds élevé est la simulation des grandes échelles. La méthode consiste à séparer les échelles en filtrant les équations de Navier-Stokes: les gros tourbillons sont résolus et les petits modélisés. Ce type d'approche permet de prendre en compte le caractère anisotrope et instationnaire des grands tourbillons et de modéliser les petits tourbillons, généralement isotropes. Généralement, la largeur du filtre correspond à la taille de la plus petite maille dans le domaine discrétisé. En d'autres termes, le maillage va conditionner la taille du filtre.

On estime que 80% de la solution est résolue directement (Andersson et al., 2012) et que 20 % de la solution doit être modélisée à l'aide d'un filtre sous-maille (*Subgrid-Scale Model*).

Après filtrations, les équations de continuité et de quantité de mouvement s'écrivent :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (39)$$

ici la barre correspond à la valeur filtrée et  $\sigma_{ij}$  le tenseur des contraintes dues à la viscosité moléculaire et défini par ;

$$\sigma_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (40)$$

et  $\tau_{ij}$  le tenseur sous-maille (*modèle SGS pour subgrid-scale*) défini par ;

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \overline{\rho} \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (41)$$

Le tenseur sous-maille contient les informations des échelles de turbulence plus petites que la largeur du filtre appliqué. L'objectif principal du SGS est de modéliser les phénomènes dans les hautes fréquences, constitué essentiellement d'une dissipation d'énergie. Un modèle SGS à zéro équation de type Smagorinsky-Lilly est généralement suffisant pour reproduire la dissipation. Cependant, ce modèle manque de précision en région proche paroi (Mendez, 2007). Le modèle WALE (pour Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity) a ainsi été développé pour augmenter la précision près des parois (Nicoud & Ducros, 1999). Ces deux modèles SGS sont disponibles dans le code de calcul *Ansys Fluent*<sup>®</sup>.

Dans le modèle WALE, la viscosité turbulente est modélisée par l'équation (21) :

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (42)$$

$$\text{avec } L_s = \min(kd, C_w V^{1/3}) \quad (43)$$

$$\text{et } S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left( \overline{g_{ij}^2} + \overline{g_{ji}^2} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{g_{kk}^2}, \quad \overline{g_{ij}} = \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad (44)$$

avec  $g_{ij}$  le gradient de vitesse.

Dans les équations (21) et (22),  $k$  est la constante de Von Karman,  $d$  est la distance à la plus proche paroi,  $V$  est le volume de la cellule de calcul et  $C_w$  et la constante de WALE égale à 0,325.

Plus d'informations concernant les filtres et les modèles SGS sont disponibles dans (Ansys, 2012) et (Azzi, 2005).

### **L'approche RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)**

L'approche RANS, dont le but est de simuler le comportement moyen, est la plus répandue. Cette approche consiste à exprimer la vitesse instantanée  $U$  en une vitesse moyenne  $\overline{U}$  et une vitesse fluctuante  $u'$ , suivant la décomposition de Reynolds.

$$U = \overline{U} + u' \quad (45)$$

$$\text{avec } \overline{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt \quad (46)$$

L'application de cette décomposition aux équations de Navier-Stokes permet d'obtenir le système de Reynolds écrit ci-dessous.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \text{div}(\rho U \vec{U}) = \frac{\partial P}{\partial x} + \text{div} \left[ \overrightarrow{\mu \text{grad}}(U) \right] - \frac{\partial(\rho \overline{u'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \quad (48)$$

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \text{div}(\rho V \vec{U}) = \frac{\partial P}{\partial y} + \text{div} \left[ \overrightarrow{\mu \text{grad}}(V) \right] - \frac{\partial(\rho \overline{v'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \quad (49)$$

$$\frac{\partial \rho W}{\partial t} + \text{div}(\rho W \vec{U}) = \frac{\partial P}{\partial z} + \text{div} \left[ \overrightarrow{\mu \text{grad}}(W) \right] - \frac{\partial(\rho \overline{w'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{w'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'w'})}{\partial z} + \vec{g} \quad (50)$$

avec  $\vec{U} = (U, V, W)$  le vecteur vitesse moyen,  $P$  la pression moyenne,  $\vec{u}' = (u, v, w)$  le vecteur vitesse fluctuante. La barre correspond à la fonction mathématique moyenne.

Dans ces équations, les termes  $\overline{\rho u_i' u_j'}$  avec  $u_i'$  et  $u_j'$  les  $i^{\text{ème}}$  et  $j^{\text{ème}}$  composantes du vecteur  $u'$ , constituent les contraintes de Reynolds. Le système comporte ainsi quatre équations avec dix inconnues : le vecteur vitesse moyenne ( $U, V, W$ ), la pression moyenne ( $P$ ) ainsi que les contraintes de Reynolds (6 inconnues). Le moyen mathématique pour résoudre le système d'équations est d'utiliser des modèles de fermeture, communément appelé modèle de turbulence. Il s'agit d'équations supplémentaires qui permettent de disposer de suffisamment d'équations pour résoudre le système. Il existe plusieurs modèles de turbulence, plus ou moins précis en fonction des phénomènes à reproduire ( $k-\varepsilon$ ,  $k-\varepsilon$  RNG,  $k-\omega$ ,  $k-\omega$  SST, RSM, etc).

L'étude bibliographique met en avant trois modèles classiques : le modèle  $k-\varepsilon$ , le modèle  $k-\varepsilon$  RNG et le modèle RSM. Nous décrivons donc uniquement ces modèles.

### **Les modèles $k-\varepsilon$ et $k-\varepsilon$ RNG**

Le modèle  $k-\varepsilon$ , considéré comme le modèle classique, est fondé sur l'hypothèse de Boussinesq qui modélise la turbulence par une force de viscosité.

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (51)$$

avec  $\mu_t$  la viscosité turbulente,  $x_i$  et  $x_j$  les  $i^{\text{ème}}$  et  $j^{\text{ème}}$  composantes du système de coordonnées  $x = (x,y,z)$ .

Ce modèle est dit à deux équations car il consiste à calculer la viscosité turbulente  $\mu_t$  en introduisant des variables propres à la turbulence : l'énergie cinétique turbulente  $k$  et le taux de dissipation  $\varepsilon$ .

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (52)$$

Les deux équations de transport pour l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation sont respectivement :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] + 2\mu_t \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \quad (53)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad}(\varepsilon) \right] + 2\mu_t C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (54)$$

Dans les équations (53) et (54), les membres de gauche représentent respectivement le taux de variation et le transport par convection et à droite, respectivement, le transport par diffusion, le taux de production, et le taux de destruction. Les constantes établies de manières empiriques sont données dans le *Tableau 39*.

L'avantage du modèle  $k-\varepsilon$  est certainement sa robustesse et sa précision par rapport au temps de calcul nécessaire. S'il a fait l'objet de nombreuses validations, ce modèle montre des limites à modéliser des écoulements en rotation. De ce fait, divers variantes ont été créés afin d'adapter le modèle à différentes situations. La différence entre le modèle  $k-\varepsilon$  *RNG* et le  $k-\varepsilon$  standard se trouve au niveau de la formulation de l'équation de dissipation et dans la valeur des constantes empiriques (*Tableau 40*).

Constantes	Valeurs
$C_\mu$	0,09
$\sigma_k$	1,00
$\sigma_\varepsilon$	1,30
$C_{1\varepsilon}$	1,44
$C_{2\varepsilon}$	1,92

*Tableau 39. Valeurs des constantes empiriques du modèle  $k-\varepsilon$*

Constantes	Valeurs
$C_\mu$	0,0845
$C_{1\varepsilon}$	1,42
$C_{2\varepsilon}$	1,68

Tableau 40. Valeurs des constantes empiriques du modèle  $k-\varepsilon$  RNG

### Le modèle RSM

Contrairement aux modèles isotropes, le modèle *RSM* (*Reynolds Stress Model*) est un modèle de fermeture du second ordre. Les contraintes de Reynolds ne sont pas modélisées selon l'hypothèse de Boussinesq, mais directement résolues.

Les équations de transport peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{dR_{ij}}{dt} = P_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Pi_{ij} + \Omega_{ij} \quad (55)$$

Dans l'équation (55), le terme  $R_{ij}$  (56) représente les contraintes de Reynolds,  $P_{ij}$  le terme de production (57),  $D_{ij}$  le terme de transport par diffusion (58),  $\varepsilon_{ij}$  le terme de dissipation (59),  $\Pi_{ij}$  le terme représentant les interactions pression/contraintes (60) et  $\Omega_{ij}$  le transport dû au mouvement de rotation (61).

$$R_{ij} = \overline{u'_i u'_j} \quad (56)$$

$$P_{ij} = - \left( R_{im} \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_m} + R_{jm} \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_m} \right) \quad (57)$$

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m} \right) \quad (58)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} \quad (59)$$

$$\Pi_{ij} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( R_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left( P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right) \quad (60)$$

avec  $C_1 = 1.8$ ,  $C_2 = 0.6$ ,  $P = \frac{1}{2} P_{kk}$  et  $k = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$

$$\Omega_{ij} = -2w_k (R_{jm} e_{ikm} + R_{im} e_{jkm}) \quad (61)$$

avec  $w_k$  le vecteur rotation.

Ce modèle est considéré comme le plus complet des modèles de turbulence. Il est conseillé dans le cas d'écoulements tourbillonnants, d'écoulements en rotation ou dans le cas de couches limites courbes (Versteeg et Malalasekera, 1995). Le fait de calculer les contraintes de Reynolds permet de prendre en compte le caractère anisotrope. En revanche, le temps de calcul est plus important.

A première vue, il est difficile de choisir la meilleure approche pour modéliser l'écoulement dans les ouvrages. Un compromis sera donc à faire entre le temps de calcul et la nature des résultats recherchés.

## 1.2 Modélisation de la surface libre

Les écoulements dans les ouvrages en assainissement sont principalement à surface libre. Les techniques numériques utilisées pour modéliser les écoulements à surface libre, et décrites dans l'étude bibliographique, sont :

- une condition de symétrie pour les surfaces libres planes
- un modèle bi-phasique *VOF*

La condition de symétrie impose le niveau d'eau. Par conséquent, en plus d'être plane, la hauteur dans l'ouvrage doit être précisément connue.

En revanche, l'utilisation d'un modèle multiphasique permet de s'affranchir de cette condition et la hauteur d'eau devient un résultat de simulation. De plus, cette méthode permet de mettre en avant la non-uniformité du niveau d'eau (les ondulations de la surface, les courbes de remous, etc).

Le modèle *Volume of Fluid (VOF)* consiste à définir une fraction volumique en air et en eau pour chaque cellule du maillage (Hirt & Nichols, 1981). La variable  $F_w$ , représentant la fraction volumique en eau est régie par l'équation (41).

$$\frac{\partial F_w}{\partial t} + U \frac{\partial F_w}{\partial x} + V \frac{\partial F_w}{\partial y} + W \frac{\partial F_w}{\partial z} = 0 \quad (62)$$

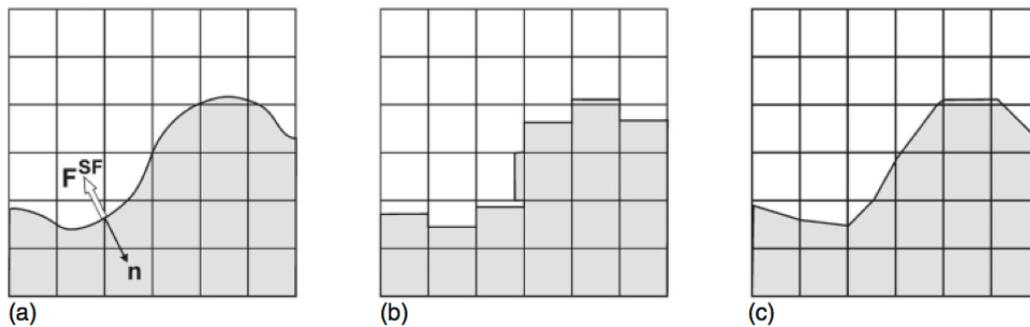
Cette méthode implique donc de modéliser les deux phases eau et air. Les propriétés du fluide sont donc calculées à partir des équations (63) et (64) en tenant compte de la fraction volumique en eau et en air.

$$\rho = F_w \rho_w + (1 - F_w) \rho_a \quad (63)$$

$$\mu = F_w \mu_w + (1 - F_w) \mu_a \quad (64)$$

avec  $\rho$  la masse volumique,  $\mu$  la viscosité dynamique,  $\rho_w$  la masse volumique de l'eau,  $\mu_w$  la viscosité dynamique de l'eau,  $\rho_a$  la masse volumique de l'air et  $\mu_a$  la viscosité dynamique de l'air.

En considérant la fraction volumique de l'eau  $F_w = 1$  et de l'air  $F_w = 0$ , la surface libre est généralement définie par  $F_w = 0,5$ . Une interpolation permet ensuite de lisser la surface libre à partir des fractions en eau et en air de chaque cellule (*Figure 228*).



*Figure 228. Schéma descriptif de la méthode VOF: (a) surface libre réelle, (b) fraction volumique en eau et en air calculée par le modèle VOF, (c) reconstruction de la surface après interpolation (Andersson et al., 2012)*

### 1.3 Schémas numériques et résolution

#### Le maillage

Le code de calcul *Ansys-Fluent*<sup>®</sup> résout les équations en utilisant la méthode des volumes finis. Cette méthode consiste à discrétiser la géométrie en plusieurs volumes élémentaires : les mailles de calcul. La construction du maillage est un élément essentiel dans la modélisation numérique, la qualité du résultat en dépendant fortement. Le nombre de cellules doit être suffisamment important pour que les résultats n'en dépendent pas. En revanche, un maillage trop volumineux augmente le temps de calcul, sans forcément augmenter la qualité des résultats si le seuil d'insensibilité au maillage est dépassé. En pratique, on densifie le maillage dans les zones où de forts gradients sont attendus.

La forme de la maille joue également un rôle important. Les mailles de forme hexaédrique sont préconisées pour diminuer le nombre de cellules dans le domaine d'étude. Cependant, pour des géométries complexes, l'utilisation de mailles tétraédriques est possible. Des techniques récentes comme le *Cut-Cell Meshing* (Ansys, 2012) permettent de discrétiser des géométries complexes à l'aide d'un maillage structuré, ce qui permet d'avoir des tailles de mailles relativement petites sans que le nombre de mailles ne soit énorme.

## Méthode des volumes finis

La forme discrétisée de l'équation de transport d'un scalaire  $\Phi$  peut s'écrire comme ceci (Ansys, 2012):

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{u}_f \Phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_f \text{grad}(\Phi_f) \cdot \vec{A}_f + S_\Phi V \quad (65)$$

avec  $V$  le volume de contrôle,  $N_{\text{faces}}$  le nombre de faces du volume de contrôle,  $\rho_f \vec{u}_f \cdot \vec{A}_f$  le flux massique à travers la face  $f$ ,  $\vec{A}_f$  le vecteur aire de la face  $f$ ,  $\Phi_f$  la valeur convectée de  $\Phi$ ,  $\Gamma_f$  le coefficient de diffusion du scalaire  $\Phi$  et  $S_\Phi$  le terme source du scalaire  $\Phi$ .

Dans le code de calcul, les valeurs sont stockées au centre des cellules. De ce fait, des schémas d'interpolations sont nécessaires pour déplacer la valeur du centre vers l'interface.

Concernant la discrétisation spatiale, un schéma amont du deuxième ordre est utilisé pour la partie convective et un schéma centré du second ordre pour la partie diffusive. Pour la discrétisation temporelle (premier terme de l'équation (65)), le choix s'est porté sur un schéma explicite au second ordre. Lorsque la méthode *VOF* est appliquée, le schéma *HRIC* est utilisé ; il s'agit d'un schéma adapté à la capture d'une interface. D'autre part, des schémas numériques spécifiques pour la pression sont disponibles. En effet, pour éviter la divergence du calcul en raison des fortes variations de pression, il est nécessaire d'appliquer un schéma *PRESTO* ou un schéma d'équilibre (*body-force-weighted*). Les lecteurs intéressés par les schémas numériques pourront se reporter aux ouvrages de Versteeg & Malalasekera (1995), Andersson & al. (2012) ou encore le manuel d'Ansys (2012).

Pour des simulations en *LES*, un schéma *Bounded Central Differencing* est recommandé (Ansys, 2012).

La résolution des équations du système se fait au moyen d'un algorithme de résolution. Pour la résolution de telles équations, l'algorithme SIMPLE (pour *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation*), qui est un processus itératif qui permet de corriger la pression et la vitesse de manière à ce que la conservation de la masse soit toujours vérifiée, est généralement utilisé.

## Convergence du calcul

La solution du calcul étant obtenue par une méthode itérative, il est possible de calculer le degré de convergence à l'aide des résidus des équations. L'état de convergence est généralement attribué lorsque les résidus sont inférieurs à un certain seuil ( $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$ ,...). Notons tout de même que le meilleur moyen de s'assurer de la convergence d'une solution est de vérifier la stabilité des variables physiques au cours des itérations.

La rapidité de convergence peut être modifiée à l'aide des coefficients de sous-relaxation. L'augmentation de la valeur des coefficients permet d'accentuer la vitesse de convergence. Cependant le risque de divergence augmente. Le choix de ces coefficients est donc un compromis entre temps de calcul et stabilité.

## 1.4 Condition aux limites

Les conditions aux limites représentent les conditions physiques aux frontières du domaine étudié. En hydraulique les principales conditions aux limites utilisées sont :

- des conditions d'entrée
- des conditions de sortie
- des conditions de paroi

### Conditions limites en entrée

Une condition de vitesse (*velocity inlet*) est généralement imposée uniformément sur la surface d'entrée. La vitesse est soit une variable connue, soit une variable calculée dans le but d'injecter un débit précis par rapport à la surface d'entrée.

L'utilisation d'un modèle de turbulence avec l'approche *RANS* nécessite d'ajouter des conditions concernant les grandeurs turbulentes. Des lois empiriques sur l'intensité turbulente (équation 21) sont généralement utilisées pour cela, l'objectif n'étant pas de bien reproduire la turbulence au niveau de la condition limite mais d'être suffisamment proche de la vraie valeur pour que la turbulence soit bien reproduite à l'endroit où l'on cherche le résultat dans le cœur du domaine.

Pour des simulations en *LES*, étant donné l'état instationnaire, il est possible d'injecter des perturbations en entrée de manière à générer de la turbulence (Ansys, 2012). Sans cela, l'écoulement sera laminaire en entrée et nécessitera une distance plus ou moins grande pour que la turbulence prenne croissance.

### Conditions limites en sortie

Différentes conditions peuvent être utilisées en sortie. Des conditions de pression (*pressure outlet*) sont généralement utilisées pour imposer une pression sur la frontière. Une pression atmosphérique est couramment utilisée pour modéliser les chutes d'eau ou encore pour évacuer l'air par une face du domaine avec un modèle *VOF*.

Parmi les conditions moins courantes, une condition de type *outflow* permet d'imposer un débit de sortie égal au débit d'entrée. Une autre méthode pour choisir d'évacuer un débit précis est d'utiliser une condition de vitesse négative. Cette technique permet de répartir les débits (ou les vitesses) dans le domaine.

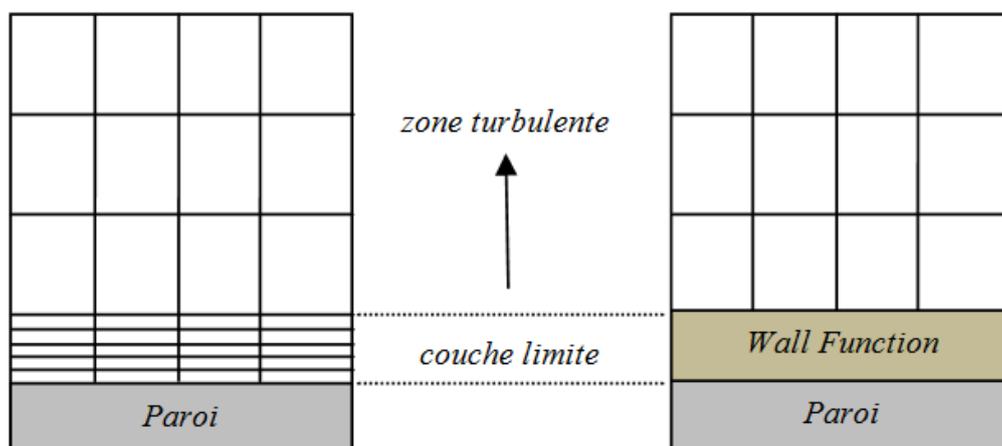
### Conditions de limite aux parois

Le rôle des parois est très important étant donné l'influence des murs sur les phénomènes de turbulence. Au sein du code, une condition de type *wall* impose un flux normal à la surface égal à zéro.

Les modèles utilisés pour modéliser les écoulements par une méthode *RANS* et *LES* ne sont plus valides dans la couche limite. De ce fait, deux approches sont utilisées pour modéliser l'écoulement dans cette région (*Figure 229*) :

- utiliser un maillage très fin et calculer exactement l'écoulement dans la couche limite
- utiliser une loi de paroi semi-empirique pour modéliser l'écoulement au sein de la couche limite

La première méthode (*Near-Wall Model Approach*) est très précise mais nécessite un nombre de mailles important. La seconde, quant à elle, requiert moins de mailles puisque l'ensemble de la zone interne est modélisé par une loi de paroi (*Wall Function*). Cette approche est tout de même contraignante puisqu'il faut adapter la taille de la première maille à la paroi.



*Figure 229. Les deux approches possibles pour modéliser la zone proche paroi*

Différentes lois de paroi semi-empiriques sont disponibles dans le code de calcul *Ansys-Fluent*<sup>®</sup>. La loi de paroi standard impose la dimension des mailles proches paroi. Une loi logarithmique est employée pour  $30 < y^+ < 300$  et une loi linéaire pour la sous-couche laminaire (*Figure 230*). Les notations  $u^+$  et  $y^+$  représentent des grandeurs adimensionnelles spécifiques aux écoulements proche paroi :

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu} \quad (66)$$

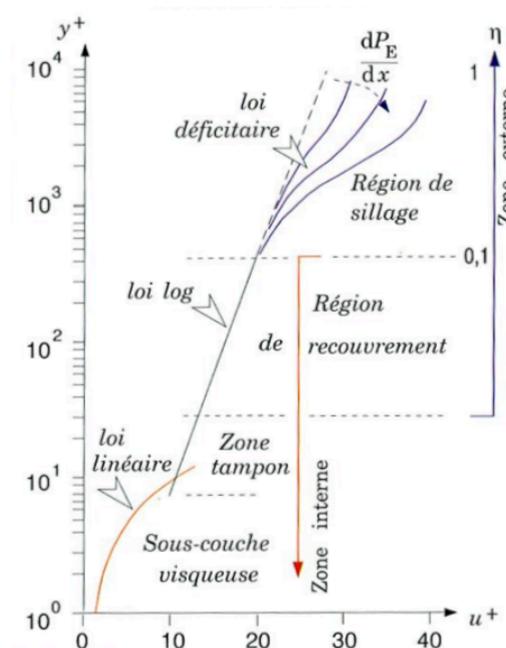
$$u^+ = \frac{\bar{U}}{u^*} \quad (67)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (68)$$

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \quad (69)$$

avec  $u^*$  la vitesse de frottement,  $y$  la distance à la paroi,  $\bar{U}$  la vitesse moyenne,  $\nu$  la viscosité dynamique et  $\tau$  la contrainte de cisaillement à la paroi.

Les lois de paroi standard sont valables pour des écoulements unidimensionnels. Certaines configurations géométriques peuvent donc nécessiter des lois plus complexes.



*Figure 230. Les différentes régions d'une couche limite turbulente (Chassaing, 2000)*

Une autre fonction dite *non equilibrium wall function* peut être utilisée lorsque nos paramètres sont soumis à des gradients de pression importants. Cette fonction est également recommandée pour des fluides impliquant des séparations, des recollements ou des impacts (Ansys, 2012).

## 2. MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE

L'étude bibliographique a mis en avant l'utilisation de l'approche euléro-lagrangienne pour modéliser le transport de particules dans les ouvrages en assainissement. Nous détaillerons cette approche dans cette partie en insistant particulièrement sur les équations fondamentales et les paramètres des modèles.

### 2.1 Equations fondamentales

L'approche euléro-lagrangienne consiste à utiliser les données de l'écoulement (fluide décrit de façon eulérienne) pour intégrer la trajectoire des particules (méthode lagrangienne).

Cette approche est utilisée lorsque l'on fait l'hypothèse que la phase particulaire n'occupe qu'un faible volume devant le fluide porteur (inférieur à 0,1 %, selon Brennen, 2005), ce qui est le cas dans les réseaux d'assainissement où la concentration en MES est généralement de quelques centaines de mg/l.

L'équation du mouvement d'une particule sphérique par un fluide porteur non uniforme a été établie par Maxey & Riley (1983). Cette équation a été décomposée en plusieurs parties de manière à distinguer les différentes forces auxquelles était soumise la particule. Dans le code de calcul *Ansys Fluent*<sup>®</sup>, cette équation s'écrit, suivant l'axe  $x$  :

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (70)$$

avec  $u_p$  la vitesse de la particule,  $u$  la vitesse instantanée du fluide,  $g_x$  l'accélération de la pesanteur selon l'axe  $x$ ,  $\rho_p$  la masse volumique de la particule,  $\rho$  la masse volumique du fluide et  $F_x$  des forces additionnelles.

Dans l'équation ci-dessus, le terme  $F_D$  correspond à la force de traînée par unité de masse tel que :

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (71)$$

avec  $C_D$  le coefficient de traînée,  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide,  $d_p$  le diamètre de la particule.  $\text{Re}$  est le nombre de Reynolds de la particule tel que :

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p (u_p - u)}{\mu} \quad (72)$$

Le coefficient de trainée  $C_D$  dans l'équation (71) est dépendant du régime de l'écoulement. Ainsi, pour des nombres de Reynolds particulaire inférieurs à 0,1, le coefficient  $C_D$  s'écrit :

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (73)$$

En revanche, pour des nombres de Reynolds supérieurs à 1000, le coefficient est calculé d'après la relation de Morsi & Alexander (Ansys, 2012) :

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\text{Re}} + \frac{\alpha_3}{\text{Re}^2} \quad (74)$$

avec  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  des constantes empiriques dépendantes du nombre de Reynolds.

Dans l'équation (71), le deuxième terme de la partie de droite correspond au poids déjaugé de la particule (poids de la particule et poussée d'Archimède).

Concernant les forces additionnelles (terme  $F_x$  dans (70)), nous prendrons en compte dans le code de calcul, la force de masse ajoutée (75) ainsi que la force due au gradient de pression (76).

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) \quad (75)$$

$$F_x = \left( \frac{\rho}{\rho_p} \right) \left( u_{px} \frac{\partial u}{\partial x} + u_{py} \frac{\partial u}{\partial y} + u_{pz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (76)$$

En raison des caractéristiques des particules en assainissement, nous pouvons négliger certaines forces comme par exemple les forces de portance ou encore la force brownienne, dont les effets sont uniquement visibles pour des particules submicroniques.

## 2.2 Reconstruction des fluctuations de vitesses et dispersion des particules

La simulation de l'écoulement donne un résultat sous forme moyennée (principe de la méthode *RANS*). En revanche, le calcul de la trajectoire de la particule s'effectue à partir des valeurs instantanées de vitesse. Ainsi, pour reproduire les fluctuations de vitesses, on utilise des méthodes stochastiques appelées "*Random Walk Models*". Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi d'utiliser une méthode "discrète" (*Discrete Random Walk*), basée sur le concept de durée de vie des tourbillons pour reproduire la dispersion particulaire.

Cette approche consiste à construire une succession de tourbillons, où chaque tourbillon est caractérisé par :

- les vitesses de fluctuations  $u'$ ,  $v'$  et  $w'$
- une durée de vie  $\tau_e$

Les vitesses fluctuantes  $u'$ ,  $v'$  et  $w'$ , dans le cas du modèle de turbulence anisotrope RSM, sont déterminées à partir des équations ci-dessous. Dans ces équations,  $\zeta$  représente une variable aléatoire normale centrée réduite.

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (77)$$

$$v' = \zeta \sqrt{v'^2} \quad (78)$$

$$w' = \zeta \sqrt{w'^2} \quad (79)$$

Dans le cas d'un modèle isotrope  $k$ - $\varepsilon$ , ces équations deviennent :

$$u' = v' = w' = \zeta \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (80)$$

La durée de vie caractéristique des tourbillons  $\tau_e$  est déterminée à partir de l'échelle de temps lagrangienne  $T_L$  (81), ou bien à partir d'une variable aléatoire  $r$  (83).

$$\tau_e = T_L \quad (81)$$

où  $T_L = C_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (82)$

$$\tau_e = -T_L \ln(r) \quad (83)$$

La constante  $C_L$  à utiliser est de 0,15 dans le cas d'un modèle isotrope, 0,3 dans le cas du modèle RSM.

De plus, le code de calcul fait l'hypothèse que la taille des tourbillons  $L_e$  est égale à l'échelle de Kolmogorov :

$$L_e = \frac{C_L}{1.225} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (84)$$

Cette taille permet de calculer la durée de traversée du tourbillon par la particule ainsi qu'exprimé ci-dessous.

$$t_{cross} = -\tau \ln \left[ 1 - \left( \frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right] \quad (85)$$

avec  $\tau$  le temps de relaxation de la particule.

Lorsque la durée de vie d'un tourbillon est atteinte, la variable aléatoire  $\zeta$  prend une nouvelle valeur pour générer un nouveau tourbillon.

### 2.3 Modèles et schémas numériques

Pour calculer la trajectoire des particules, une première équation est résolue en intégrant le bilan des forces (86) puis une deuxième reliant la vitesse et la position (87).

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (u - u_p) + a \quad (86)$$

avec  $a$  l'ensemble des forces (sauf la force de trainée).

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (87)$$

Ces équations peuvent être résolues de manière analytique ou numérique. L'utilisation de la méthode numérique est préférable dans la mesure où la méthode analytique devient inefficace pour des pas de temps importants ou lorsque la particule n'est pas en équilibre dynamique avec la phase fluide (Ansys, 2012).

Dans le cas de la méthode numérique, deux schémas numériques permettent de discrétiser l'équation (86) : un schéma Euler implicite (88) ou un schéma trapézoïdal (92).

$$\frac{u_p^{n+1} - u_p^n}{\Delta t} = \frac{1}{\tau} (u^n - u_p^{n+1}) + a^n \quad (88)$$

$$\frac{u_p^{n+1} - u_p^n}{\Delta t} = \frac{1}{\tau} (u^* - u_p^*) + a^n \quad (89)$$

$$\text{avec } u^* = \frac{1}{2} (u^n - u_p^{n+1}) \quad (90)$$

$$\text{et } u_p^* = \frac{1}{2} (u_p^n - u_p^{n+1}) \quad (91)$$

L'équation reliant la vitesse et la position (86) est résolue par un schéma trapézoïdal :

$$X_p^{n+1} = X_p^n + \frac{1}{2} \Delta t (u_p^n + u_p^{n+1}) \quad (92)$$

L'intégration numérique est contrôlée par le pas de temps  $\Delta t$  (93) ainsi que le nombre de pas de temps.

$$\Delta t = \frac{\Delta t^*}{\lambda} \quad (93)$$

avec  $\Delta t^*$  le temps nécessaire à une particule pour traverser la cellule et  $\lambda$  un facteur d'échelle d'espace.

## 2.4 Conditions aux limites

Différentes conditions sont applicables pour les conditions aux limites.

### En entrée

L'injection des particules en entrée se fait uniformément sur la totalité de la section d'entrée. Les propriétés granulométriques des particules peuvent être renseignées en modifiant la masse volumique et le diamètre des particules. Une injection de particules peut se faire soit en utilisant des propriétés des particules fixes, c'est à dire que toutes les particules injectées sont identiques, soit en utilisant une distribution granulométrique.

La vitesse d'entrée des particules est également à définir. La valeur choisit correspond généralement à la vitesse de l'écoulement en entrée.

### En sortie

En sortie, une condition de type "*escape*" permet de quantifier les particules dont la trajectoire a pris fin.

### Au niveau des parois

Concernant les parois, deux conditions sont disponibles :

- une condition "*reflect*", où la particule va rebondir selon une loi de choc puis être réentraînée dans le fluide ;
- une condition "*trap*", où la particule va être stoppée, car considérée comme déposée.

## ANNEXE C : DETERMINATION DU DEBIT A PARTIR DES HAUTEURS D'EAU A L'AVAL DU DEVERSOIR

La détermination du débit à partir des hauteurs à l'aval du déversoir s'effectue en trois étapes :

- le calcul de la hauteur critique pour obtenir la charge critique ;
- le calcul des pertes de charges dues à l'engouffrement dans la canalisation ;
- l'estimation de la charge à l'aval du déversoir.

### 1. CALCUL DE LA HAUTEUR CRITIQUE

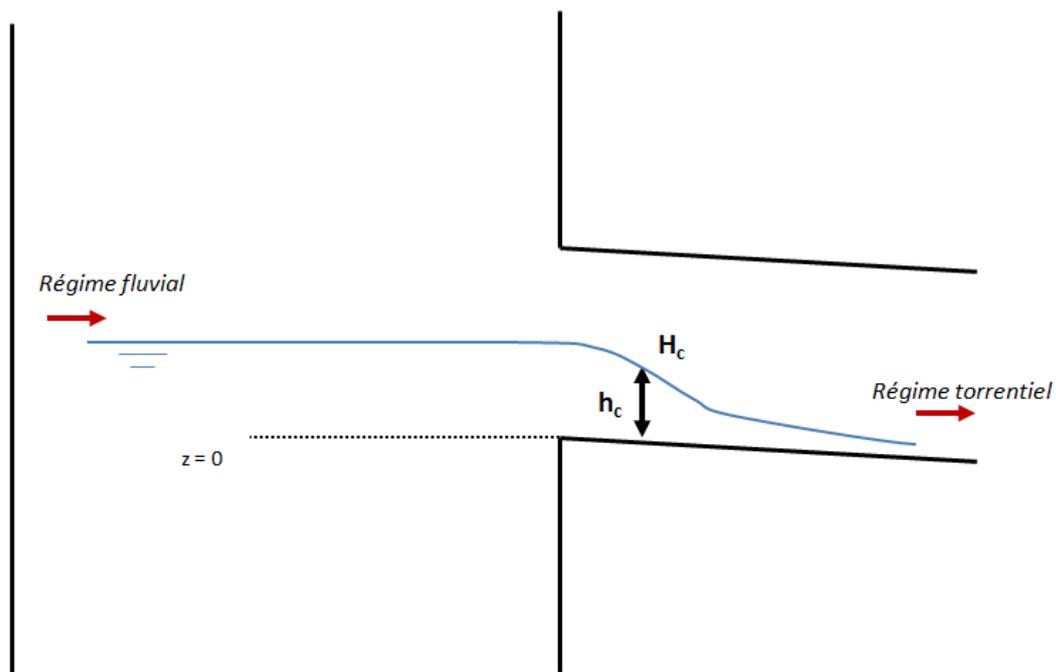


Figure 231. Représentation schématique de la hauteur critique à la sortie de l'ouvrage de Trouville-sur-Mer

La hauteur critique  $h_c$  illustré sur la Figure 231 se calcule en considérant un nombre de Froude égal à 1.

$$\frac{Q^2}{S(h_c)^2 g D_h(h_c)} = 1 \quad (94)$$

Dans cette équation,  $Q$  est le débit en  $m^3/s$ ,  $S$  la section de l'écoulement en  $m^2$ ,  $g$  l'accélération gravitationnelle en  $m/s^2$  et  $D_h$  le diamètre hydraulique en  $m$ . Pour une canalisation circulaire, la hauteur critique peut se calculer de façon approchée avec la formulation suivante :

$$h_c \approx \left( \frac{Q}{\sqrt{gD}} \right)^{1/2} \quad (95)$$

Notons que cette formule est valable pour des remplissages  $h_c / D$  compris entre 0,20 et 0,91 ( $D$  étant le diamètre de la canalisation) ; l'erreur est alors inférieure à 4 % (Hager, 1999).

Une fois la hauteur critique déterminée, la charge correspondante, appelée aussi charge critique  $H_c$ , peut être déterminée comme suit :

$$H_c = h_c + \frac{D_h(h_c)}{2} \quad (96)$$

La référence de cette charge est le radier de la canalisation (voir *Figure 231*). Pour changer de référence, il suffit de considérer la différence d'altitude entre le radier de la canalisation et la référence voulue.

## 2. CALCUL DES PERTES DE CHARGE DUE A L'ENGOUFFREMENT

Une fois la charge connue au point de contrôle, il est possible de déterminer la charge au niveau de la chambre d'arrivée au siphon en évaluant la perte de charge entre la chambre siphonide et la canalisation de sortie. Cette perte de charge se traduit donc par l'engouffrement dans la canalisation de sortie. Par conséquent, même si l'écoulement n'est pas en charge, on peut se référer à l'ouvrage d'Idel'cik (1986). Dans le cas d'une entrée droite, directement greffée sur les parois et pour un nombre de Reynolds supérieur à  $10^4$ , la perte de charge s'écrit suivant l'équation suivante.

$$j_{engouffrement} \approx 0.5 \frac{V^2}{2g} \quad (97)$$

La vitesse  $V$  dans cette équation peut être déterminée à partir de la section critique  $S_c$  en utilisant l'expression approchée avec une erreur maximale de 1% (Hager, 1999).

$$S_c = D^2 \frac{4}{3} y^{3/2} \left( 1 - \frac{y}{4} - \frac{4y^2}{25} \right) \quad (98)$$

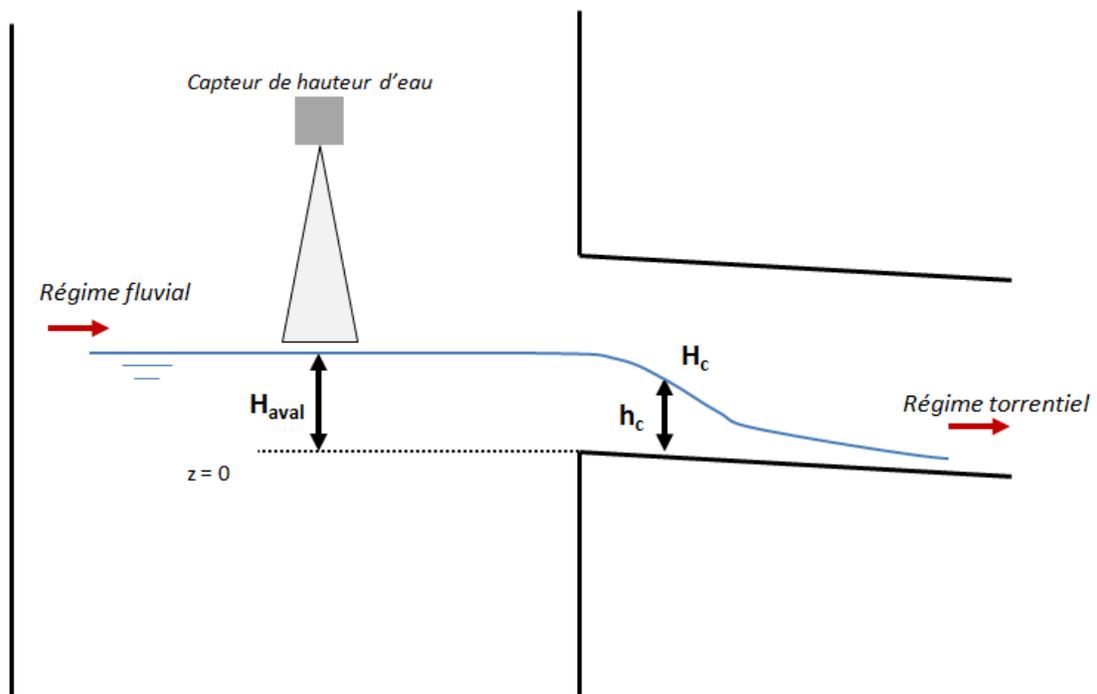
avec  $D$  le diamètre et  $y$  le rapport entre la hauteur d'eau sur le diamètre.

Ainsi, en ajoutant ces pertes de charge à la charge critique, on obtient la charge à l'aval du siphon.

$$H_{aval} = H_c + j_{engouffrement} \quad (99)$$

L'énergie dans la chambre siphonoïde étant sous forme potentielle, la charge  $H_{aval}$  est donc équivalente à la hauteur d'eau.

Connaissant donc la hauteur d'eau dans la chambre siphonoïde (*Figure 232*), il est donc possible de déterminer successivement la charge à l'aval, la charge critique puis la hauteur critique et donc le débit.



*Figure 232. Représentation schématique de la détermination du débit pour l'ouvrage de Trouville-sur-Mer*



## Investigation expérimentale et numérique d'un ouvrage de séparation particulaire en assainissement

### Résumé

La qualité des milieux naturels passe par l'installation d'ouvrages de séparation particulaire dans les réseaux d'assainissement. Dans le cadre de cette thèse, un ouvrage de type séparateur hydrodynamique est étudié pour répondre aux problématiques environnementales liées aux déversements de macro-déchets en mer. La technique de séparation tangentielle le long d'une grille est utilisée au sein de cet ouvrage.

La première partie est destinée à l'analyse du fonctionnement hydraulique de l'ouvrage et son aptitude face au colmatage sur un pilote en laboratoire. Les données collectées vont ensuite permettre la validation d'une approche numérique multi-échelles permettant de simuler l'écoulement dans l'ouvrage ainsi qu'à proximité de la grille. Cette technique est par la suite utilisée pour optimiser l'écoulement et la forme de la grille. Nous avons démontré, à partir notamment de simulations numériques, l'intérêt d'une grille de type métal déployé pour obtenir des phénomènes d'agitations turbulentes et de gradient de pression important à l'amont de la grille. Ces phénomènes physiques favoriseraient ainsi la dispersion des polluants et limiteraient les phénomènes de colmatage. La dernière partie de ce travail a été d'étudier le fonctionnement d'un ouvrage grandeur nature et d'observer son efficacité.

Mots-clés : ouvrages hydrauliques, simulation numérique 3D multi-échelles, expérimentations en laboratoire, étude de terrain, transport solide, séparation solide-liquide à l'aide d'une grille

### Résumé en anglais

The installation of hydraulic structures to separate particles is a key element to improve the quality of water bodies. This PhD work focus on the study of a hydrodynamic separator used to capture large wastes before their discharge into the see. Tangential separation mechanism along a screen is used in this device.

The first part of the work consists in studying the hydraulic behavior and the clogging effectiveness of the device with laboratory experiments. A CFD multiscale approach was developed in this work to optimize the shape of the screen in order to avoid clogging. This method, validated against experimental data, allows us to predict that expanded metal stripes are useful to develop turbulence and pressure gradients upstream the screen. This hydrodynamic phenomenon favor particles and pollutants ejection near the apertures. The last part of the work was to study the hydrodynamic behavior and the real efficiency with in situ experiments.

Key words: hydraulic structures, 3D multiscale CFD, laboratory experiments, in situ studies, solid transport, solid-liquid separation with screens