

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Mémoire présenté à
L'Université du Québec à Chicoutimi
comme exigence partielle
de la Maîtrise en Ingénierie

Par
Audrey MURRAY-CHIASSON
B. ing.

**ÉTUDE DE LA RELÂCHE DES INCLUSIONS LORS DE LA
FILTRATION DE L'ALUMINIUM LIQUIDE**

Décembre 2002



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

**À Jeanne et Roland, Gabrielle et Yvon
À mon père Bernard
À ma mère Ginette**

Remerciements

Je me dois ici de remercier plusieurs personnes sans lesquelles ce projet n'aurait pu prendre forme, se réaliser et s'achever.

Tout d'abord je tiens à remercier le Dr Duygu Kocaeefe et son complice, Yasar, pour toute l'aide et tout le soutien qu'ils m'ont prodigués durant ces deux années aux études supérieures. Leurs qualités de scientifiques tout comme leurs nombreuses qualités humaines font d'eux des êtres exceptionnels qu'il faut connaître. Duygu et Yasar, je ne vous oublierai jamais.

Ensuite, je voudrais remercier Monsieur Patrice Paquette pour les bons conseils, techniques et autres, si généreusement partagés.

Je m'en voudrais de ne pas saluer toute la "gang" du GRIPS, les nouveaux comme les anciens. Merci à Azad, Guvenc, Carl, Thomas, Géza, Zafer, et Alexandre. Merci aussi à Sandor, Pascal, Amal, Vincent, Alain, Remy, Raynald et Guy. Passer les journées avec vous a rendu cette aventure encore plus enrichissante.

Je remercie également la famille Bégin-Basque et la famille Dufour-Vachon. Vous avez toujours eu les bons mots pour m'encourager et m'aider dans les moments plus difficiles.

J'exprime aussi ma gratitude à ma famille, Gaétane, Roger, Kathleen et Hugues pour tout le support offert durant ces années d'études. Je sais que vous resterez toujours près de moi et que je pourrai toujours compter sur vous.

Merci beaucoup à Marc. Depuis le tout début, tu as toujours cru que je pouvais y arriver. Maintenant, ça y est!

Merci aussi à Emmanuel pour le bonheur des années qui continuent d'être et de passer.

Finalement, merci à ma mère. Merci à toi, qui a su me montrer, que la persévérance venait à bout de tous les obstacles, de toutes les difficultés, de tous les maux. Je t'aime et je sais que tu seras toujours là, avec moi.

Sincèrement,

Audrey

Résumé

La filtration de l'aluminium liquide est l'étape critique du processus de purification du métal avant la coulée en lingots. La filtration de l'aluminium permet d'éliminer les impuretés solides (inclusions), non métalliques, de très petites tailles, qui pourraient être la cause de trous ou de déchirures dans la production de fils ou de feuilles minces. Effectuée à travers un filtre granulaire d'alumine tabulaire, la filtration est un procédé semi-continu. Lorsque le processus est arrêté, puis reparti, pour des raisons inhérentes au procédé ou même en période continue, un phénomène de relâche des inclusions capturées précédemment par le filtre granulaire peut survenir et affecter la qualité du métal produit.

Une étude expérimentale sur la relâche d'inclusions sphériques de PVC par les filtres granulaires représentant ceux utilisés en industrie est menée. Grâce à un montage permettant l'utilisation de l'eau comme fluide porteur, la reproduction d'un système de filtration industriel est réussie puisque l'eau possède une viscosité cinétique qui est du même ordre de magnitude que celle de l'aluminium en fusion. Beaucoup d'études ont tenté d'exprimer le terme d'accumulation des inclusions dans plusieurs types de filtres. Cependant, peu de ces études tentent de prouver l'existence et tentent d'exprimer mathématiquement le phénomène de relâche en écoulement continu, encore plus rarement, en écoulement interrompu. Un modèle mathématique à une dimension d'écoulement à travers un filtre granulaire permettant de reproduire les courbes de concentration de sortie et de déposition totale a été créé afin de faire ressortir les expressions cinétiques des termes d'accumulation et de relâche en écoulement continu et en écoulement interrompu (la déposition totale étant la différence entre l'accumulation des inclusions de PVC sur les grains filtrants et la relâche par le filtre granulaire de ces mêmes inclusions en écoulement continu ou interrompu. Ce modèle utilise donc une géométrie elliptique pour représenter la forme des grains filtrants puisque c'est cette géométrie qui décrit le mieux le médium industriel.

L'étude présente a pu, grâce aux courbes expérimentales et au modèle, déterminer s'il y a présence de relâche en écoulement continu et en écoulement interrompu sur une période de 7 heures, période représentant la capacité totale de fonctionnement du montage expérimental.

Parallèlement à l'objectif d'exprimer la relâche en écoulement continu et en écoulement interrompu, une étude paramétrique qualitative permettant d'identifier les paramètres d'opérations favorisant le plus l'accumulation des inclusions et minimisant le plus possible la présence du phénomène de relâche en écoulement continu et en écoulement interrompu est menée. Il s'avère qu'une taille plus petite de grains filtrants favorise l'accumulation des inclusions en écoulement continu et interrompu et que des filtres granulaires plus longs minimisent la présence de la relâche surtout en écoulement interrompu. L'augmentation étudiée de la teneur en inclusions à l'entrée du filtre granulaire favorise plus l'accumulation qu'aux conditions standards et n'a pas d'influence directe sur le relâche en écoulement interrompu. Finalement, l'augmentation de vitesse de l'écoulement à tendance à influencer négativement l'accumulation en écoulement continu et en écoulement interrompu et influence également négativement la relâche en écoulement interrompu.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|-------------------------|-------|
| Remerciements..... | iii |
| Résumé..... | iv |
| Table des matières..... | vi |
| Liste des figures..... | ix |
| Liste des tableaux..... | xv |
| Liste des annexes..... | xvii |
| Nomenclature..... | xviii |

CHAPITRE 1- INTRODUCTION

| | |
|--|----|
| 1.1 Préambule..... | 1 |
| 1.2 La filtration de l'aluminium liquide : description du procédé..... | 2 |
| 1.3 Travaux antérieurs..... | 5 |
| 1.4 Positionnement de la démarche..... | 25 |
| 1.4.1 Du point de vue des inclusions..... | 26 |
| 1.4.2 Du point de vue du fluide..... | 27 |
| 1.5 Contribution de la présente étude à la recherche..... | 28 |
| 1.5.1 Objectif général..... | 28 |
| 1.5.1.1 Objectifs spécifiques..... | 28 |
| 1.5.2 Avancement..... | 29 |

CHAPITRE 2- DESCRIPTION DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL ET DES MÉTHODES D'ANALYSE

| | |
|-----------------------------------|----|
| 2.1 Introduction..... | 31 |
| 2.2 Montage expérimental..... | 31 |
| 2.2.1 Description du montage..... | 32 |

| | |
|--|----|
| 2.2.2 Description de l'instrumentation..... | 35 |
| 2.2.2.1 Calibrage de l'instrumentation..... | 37 |
| 2.3 Description des essais réalisés..... | 37 |
| 2.4 Description de la méthode d'analyse..... | 39 |
| 2.4.1 Quant à la répétitivité..... | 39 |
| 2.4.2 Quant au comportement de la déposition totale..... | 41 |
| 2.4.3 Quant au phénomène de relâche existant..... | 42 |

CHAPITRE 3- PRÉSENTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

| | |
|--|----|
| 3.1 Introduction..... | 44 |
| 3.2 Données de concentration..... | 44 |
| 3.3 Validité des données de concentration..... | 48 |
| 3.4 Analyse de l'efficacité du filtre granulaire..... | 56 |
| 3.4.1 En écoulement continu..... | 65 |
| 3.4.2 En écoulement interrompu..... | 72 |
| 3.5 Analyse des courbes de déposition..... | 76 |
| 3.5.1 En écoulement continu..... | 78 |
| 3.5.1.1 Commentaire sur l'existence de la relâche..... | 88 |
| 3.5.2 En écoulement interrompu..... | 88 |
| 3.5.2.1 Commentaire sur l'existence de la relâche..... | 98 |

CHAPITRE 4- MODÈLE UNE DIMENSION D'ACCUMULATION ET DE RELÂCHE

| | |
|---|-----|
| 4.1 Introduction..... | 99 |
| 4.2 Développement du modèle mathématique..... | 99 |
| 4.3 Description des coefficients K_1 , K_2 et K_3 | 105 |
| 4.3.1 Coefficient K_1 | 105 |

| | |
|---|-----|
| 4.3.2 Coefficient K_2 | 111 |
| 4.3.3 Coefficient K_3 | 112 |
| 4.4 Précision sur l'évolution de la porosité dans le filtre granulaire..... | 114 |
| 4.5 Algorithme de programmation..... | 115 |
| 4.6 Présentation des résultats de simulations..... | 115 |
| 4.6.1 En écoulement continu..... | 116 |
| 4.6.2 En écoulement interrompu..... | 123 |
| 4.7 Présentation des coefficients d'accumulation et de relâche..... | 130 |
| 4.7.1 En écoulement continu..... | 130 |
| 4.7.2 En écoulement interrompu..... | 135 |
| 4.8 Correspondance du terme d'accumulation..... | 138 |
| 4.9 Particularités du modèle..... | 140 |
| CHAPITRE 5- CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS | |
| 5.1 Conclusions..... | 164 |
| 5.2 Recommandations..... | 169 |
| Bibliographie..... | 171 |
| Annexe 1 :Résultats de calibrage des préamplificateurs..... | 173 |
| Annexe 2 :Procédures de préparation du modèle expérimental à eau et des sondes LiMCA..... | 175 |
| Annexe 3 :Procédure de test pour les deux types d'écoulement étudiés..... | 179 |
| Annexe 4 :Calcul relatif à la solution concentrée d'inclusions de PVC..... | 182 |
| Annexe 5 :Caractéristiques des grains filtrants étudiés..... | 184 |
| Annexe 6 :Description des équations de différences finies..... | 188 |
| Annexe 7 :Développement de la courbe normale de distribution du modèle..... | 191 |
| Annexe 8 :Description des paramètres du modèle qui peuvent être modifiés..... | 195 |

Liste des figures

- Figure 1.1 : Filtre industriel
- Figure 1.2 : Schéma du mécanisme de sédimentation
- Figure 2.1 : Montage expérimental
- Figure 2.2 : Inclusions sphériques de PVC
- Figure 2.3 : Schéma de l'instrumentation
- Figure 3.1 : Exemple de données recueillies
- Figure 3.2 : Lissage des données expérimentales-écoulement continu
- Figure 3.3 : Lissage des données expérimentales-écoulement interrompu
- Figure 3.4 : Approximation des coefficients de filtration par la pente
- Figure 3.5 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 1
(cond. stand.)
- Figure 3.6 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 2
(cond. stand.)
- Figure 3.7 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 3 (3-6 mm)
- Figure 3.8 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 4 (3-6 mm)
- Figure 3.9 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 5 (6-12 mm)
- Figure 3.10 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série (6-12 mm)
- Figure 3.11 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 7 (3.6 mm/s)
- Figure 3.12 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 8
(3.6 mm/s)
- Figure 3.13 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 9
(175 000 inc/kg eau)
- Figure 3.14 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 10
(175 000 inc/kg eau)
- Figure 3.15 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 11
(700 000 inc/kg eau)

- Figure 3.16 : Évolution de l'efficacité pour 1.5-3, 3-6 et 6-12 mm séries 1, 3 et 5 – 4 po
- Figure 3.17 : Évolution de l'efficacité pour 1.8 et 3.6 mm/s séries 1 et 7 – 4 po
- Figure 3.18 : Évolution de l'efficacité pour 100 000, 175 000 et 700 000 inc/kg eau séries 1, 9 et 11 – 4 po
- Figure 3.19 : Évolution de l'efficacité série 2 (cond. stand.)
- Figure 3.20 : Évolution de l'efficacité série 4 (3-6 mm)
- Figure 3.21 : Évolution de l'efficacité série 6 (6-12 mm)
- Figure 3.22 : Évolution de l'efficacité série 8 (3.6 mm/s)
- Figure 3.23 : Évolution de l'efficacité série 10 (175 000 inc/kg eau)
- Figure 3.24 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 1 (cond. stand.)
- Figure 3.25 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 3 (3-6 mm)
- Figure 3.26 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 5 (6-12 mm)
- Figure 3.27 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 7 (3.6 mm/s)
- Figure 3.28 : Taux nets de déposition obtenus selon la hauteur du filtre, séries 1, 3, 5, et 7
- Figure 3.29 : Taux nets de déposition obtenus selon la hauteur du filtre, séries 1, 9 et 11
- Figure 3.30 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 2 (cond. stand.)
- Figure 3.31 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 4 (3-6 mm)
- Figure 3.32 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 6 (6-12 mm)
- Figure 3.33 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 8 (3.6 mm/s)

- Figure 3.34 : Nombre de particules relâchées selon la hauteur du filtre, séries 2, 4, 6, 8 et 10
- Figure 4.1 : Géométrie d'un grain filtrant modélisé
- Figure 4.2 : Évolution de la géométrie du grain filtrant avec l'accumulation
- Figure 4.3 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 1 -4po (cond. stand.)
- Figure 4.4 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 3 -4po (3-6 mm)
- Figure 4.5 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 5 -4po (6-12 mm)
- Figure 4.6 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 7 -4po (3.6 mm/s)
- Figure 4.7 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 9 -4po (175 000 inc/kg eau)
- Figure 4.8 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 11 -4po (700 000 inc/kg eau)
- Figure 4.9 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 2 -4po (cond. stand.)
- Figure 4.10 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 4 -4po (3-6 mm)
- Figure 4.11 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 6 -4po (6-12 mm)
- Figure 4.12 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 8 -4po (3.6 mm/s)
- Figure 4.13 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 10 -4po (175 000 inc/kg eau)
- Figure 4.14 : Évolution du coefficient d'accumulation K_1 . Série 1 (cond. stand.)

- Figure 4.16 : Évolution du coefficient d'accumulation K_1 . Série 2 (cond. stand.)
- Figure 4.17 : Évolution de la fonction des coefficients de relâche en interrompu K_3 . Série 2 (cond. stand.)
- Figure 4.18 : Évolution du coefficient de filtration. Série 1 (cond. stand.)
- Figure 4.19 : Évolution de la concentration – écoulement continu – Série 1 (cond. stand.)
- Figure 4.20 : Évolution de la déposition totale – écoulement continu – Série 1 (cond. stand.)
- Figure 4.21 : Évolution de la porosité – écoulement continu – Série 1 (cond. stand.)
- Figure 4.22 : Évolution de la concentration – écoulement interrompu – Série 2 (cond. stand.)
- Figure 4.23 : Évolution de la déposition totale – écoulement interrompu – Série 2 (cond. stand.)
- Figure 4.24 : Évolution de la porosité – écoulement interrompu – Série 2 (cond. stand.)
- Figure 4.25 : Évolution de la concentration – écoulement continu – Série 3 (3-6 mm)
- Figure 4.26 : Évolution de la déposition totale – écoulement continu – Série 3 (3-6 mm)
- Figure 4.27 : Évolution de la porosité – écoulement continu – Série 3 (3-6 mm)
- Figure 4.28 : Évolution de la concentration – écoulement interrompu – Série 4 (3-6 mm)
- Figure 4.29 : Évolution de la déposition totale – écoulement interrompu – Série 4 (3-6 mm)
- Figure 4.30 : Évolution de la porosité – écoulement interrompu – Série 4 (3-6 mm)

Figure 4.31 : Évolution de la concentration – écoulement continu – Série 5
(6-12mm)

Figure 4.32 : Évolution de la déposition totale – écoulement continu – Série 5
(6-12 mm)

Figure 4.33 : Évolution de la porosité – écoulement continu – Série 5
(6-12 mm)

Figure 4.34 : Évolution de la concentration – écoulement interrompu – Série 6
(6-12 mm)

Figure 4.35 : Évolution de la déposition totale – écoulement interrompu – Série 6
(6-12 mm)

Figure 4.36 : Évolution de la porosité – écoulement interrompu – Série 6
(6-12 mm)

Figure 4.37 : Évolution de la concentration – écoulement continu – Série 7
(3.6 mm/s)

Figure 4.38 : Évolution de la déposition totale – écoulement continu – Série 7
(3.6 mm/s)

Figure 4.39 : Évolution de la porosité – écoulement continu – Série 7
(3.6 mm/s)

Figure 4.40 : Évolution de la concentration – écoulement interrompu – Série 8
(3.6 mm/s)

Figure 4.41 : Évolution de la déposition totale – écoulement interrompu – Série 8
(3.6 mm/s)

Figure 4.42 : Évolution de la porosité – écoulement interrompu – Série 8
(3.6 mm/s)

Figure 4.43 : Évolution de la concentration – écoulement continu – Série 9
(175 000 inc/kg eau)

Figure 4.44 : Évolution de la déposition totale – écoulement continu – Série 9
(175 000 inc/kg eau)

Figure 4.45 : Évolution de la porosité – écoulement continu – Série 9
(175 000 inc/kg eau)

Figure 4.46 : Évolution de la concentration – écoulement interrompu – Série 10
(175 000 inc/kg eau)

Figure 4.47 : Évolution de la déposition totale – écoulement interrompu –
Série 10 (175 000 inc/kg eau)

Figure 4.48 : Évolution de la porosité – écoulement interrompu – Série 10
(175 000 inc/kg eau)

Figure 4.49 : Évolution de la concentration – écoulement continu – Série 11
(700 000 inc/kg eau)

Figure 4.50 : Évolution de la déposition totale – écoulement continu – Série 11
(700 000 inc/kg eau)

Figure 4.51 : Évolution de la porosité – écoulement continu – Série 11
(700 000 inc/kg eau)

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Plan expérimental

Tableau 3.1 : Comparaison des conditions expérimentales - séries 1 et 2 (cond. stand.)

Tableau 3.2 : Comparaison des conditions expérimentales - séries 3 et 4 (3-6 mm)

Tableau 3.3 : Comparaison des conditions expérimentales - séries 5 et 6 (6-12 mm)

Tableau 3.4 : Comparaison des conditions expérimentales - séries 7 et 8 (3.6 mm/s)

Tableau 3.5 : Comparaison des conditions expérimentales- séries 9 et 10 (175 000 inc./kg eau)

Tableau 3.6 : Comparaison des conditions expérimentales - série 11 (700 000 inc./kg eau)

Tableau 3.7 : Comparaison λ expérimental vs λ théorique

Tableau 3.8 : Description des séries de tests effectuées

Tableau 3.9 : Résumé des écarts (en %) obtenus d'efficacité par rapport aux conditions standards - écoulement continu

Tableau 3.10 : Taux de déposition net obtenus pour chaque série d'essais
$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}_{\text{exp}}}{\partial \bar{t}} \right)$$

Tableau 3.11 : Résumé des écarts (en %) obtenus du taux net de déposition par rapport aux conditions standards - écoulement continu

Tableau 3.12 : Quantité de particules relâchées pour chaque essai effectué

Tableau 3.13 : Résumé des écarts (en %) obtenus du nombre adimensionné d'inclusions relâchées par rapport aux conditions standards - écoulement interrompu

Tableau 3.14 : Résumé des écarts (en %) obtenus du nombre d'inclusions relâchées par rapport au lit d'un pouce - écoulement interrompu

Tableau 4.1 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 1 (cond. stand.)

Tableau 4.2 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 3 (3-6 mm)

Tableau 4.3 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 5 (6-12 mm)

Tableau 4.4 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 7 (3.6 mm/s)

Tableau 4.5 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 9 (175 000 inc/kg eau)

Tableau 4.6 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 11
(700 000 inc/kg eau)

Tableau 4.7 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 2 (cond. stand.)

Tableau 4.8 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 4 (3-6 mm)

Tableau 4.9 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 6 (6-12 mm)

Tableau 4.10 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 8 (3.6 mm/s)

Tableau 4.11 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 10
(175 000 inc/kg eau)

Tableau 4.12 : Coefficients initiaux d'accumulation (K_1) et de relâche en continu (K_2)

Tableau 4.13 : Coefficient initial d'accumulation (K_1) et paramètres de la fonction de coefficients de relâche en interrompu (K_3)

Tableau 4.14 : Comparaison λ calculé vs λ théorique

Tableau 5.1 : Résumé de l'influence des paramètres étudiés – écoulement continu

Tableau 5.2 : Résumé de l'influence des paramètres étudiés – écoulement interrompu

Tableau 5.3 : Résumé des coefficients et paramètres ajustables de la fonction de coefficients du bilan net de déposition

Liste des annexes

- Annexe 1 : Résultats de calibrage des préamplificateurs
- Annexe 2 : Procédures de préparation du modèle expérimental à eau et des sondes LiMCA
- Annexe 3 : Procédure de test pour les deux types d'écoulement étudiés
- Annexe 4 : Calcul relatif à la solution concentrée d'inclusions de PVC
- Annexe 5 : Caractéristiques des grains filtrants étudiés
- Annexe 6 : Descriptions des équations de différences finies
- Annexe 7 : Développement de la courbe normale de distribution du modèle
- Annexe 8 : Description des paramètres du modèle qui peuvent être modifiés

Nomenclature

| | | |
|--------------|--|--|
| a | Grandeur de l'axe le plus long du grain filtrant | [m] |
| A | Constante d'ajustement de relâche | [1/s] |
| A_g | Aire de la face du grain | [m ²] |
| A_l | Aire de la surface du lit | [m ²] |
| b | Grandeur de l'axe le plus court du grain filtrant avec déposition | [m] |
| b_0 | Grandeur initiale de l'axe le plus court du grain filtrant (sans déposition) | [m] |
| B | Constante d'ajustement de déposition | [m ³ lit/inc.] |
| c | Concentration d'inclusions dans le fluide | [inc./m ³ fluide] |
| C | Concentration d'inclusions dans l'eau | [inc./kg eau] |
| \bar{C} | Concentration adimensionnée d'inclusions dans l'eau | |
| $C_{entrée}$ | Concentration d'inclusions dans l'eau à l'entrée du filtre | [inc./kg eau] |
| C_{sortie} | Concentration d'inclusions dans l'eau à la sortie du filtre | [inc./kg eau] |
| C_0 | Concentration d'entrée d'inclusions dans l'eau à 6000 secondes | [inc./kg eau] |
| C'_0 | Concentration d'entrée d'inclusions dans l'eau à 6000 secondes adimensionnée | |
| d_i | Diamètre de l'inclusion | [m] |
| d_g | Diamètre du grain filtrant | [m] |
| E_r | Coefficient de dispersion radial (en direction r) | [m ² *m ³ fluide /m ³ lit *s] |

| | | |
|-------------|--|---|
| E_z | Coefficient de dispersion axial (en direction z) | $[m^2*m^3 \text{ fluide} / m^3 \text{ lit *s}]$ |
| F | Capacité de rétention du filtre | $[\text{inc./m}^3 \text{ lit}]$ |
| g | Constante gravitationnelle | $[m/s^2]$ |
| h | Pas de temps adimensionné | |
| J | Gradient hydraulique | $[kg/m*s^2]$ |
| k_1 | Constante d'ajustement d'accumulation | $[m/kg*s*grains]$ |
| k'_1 | Constante d'ajustement d'accumulation | $[m^3 \text{ vide} / m^3 \text{ lit*s}]$ |
| k''_1 | Constante d'ajustement d'accumulation | $[1/\text{inc.}]$ |
| K_1 | Coefficient d'accumulation | $[1/m^3*s]$ |
| \bar{K}_1 | Coefficient d'accumulation adimensionnée | |
| k_2 | Constante d'ajustement de relâche en écoulement continu | $[m/grains*s]$ |
| k'_2 | Constante d'ajustement de relâche | $[m*s / kg]$ |
| k''_2 | Constante d'ajustement de relâche | $[1/s]$ |
| K_2 | Coefficient de relâche en écoulement continu | $[1/s]$ |
| \bar{K}_2 | Coefficient de relâche en écoulement continu adimensionnée | |
| K_3 | Coefficient de relâche en écoulement interrompu | $[1/s]$ |
| \bar{K}_3 | Coefficient de relâche en écoulement interrompu adimensionnée | |
| L | Longueur ou hauteur du filtre | $[m]$ |
| M_1 | Coefficient d'ajustement de la courbe de distribution de relâche en interrompu | |
| M_2 | Coefficient d'ajustement de la courbe de distribution de relâche en interrompu | |
| N | Nombre de grains filtrants par volume d'une section de lit | $[\text{grains}/m^3 \text{ lit}]$ |

| | | |
|-----------------|---|---|
| P | Rapport du volume des grains filtrants dans le filtre | [m ³ grains /m ³ lit] |
| r | Temps de résidence du fluide à l'intérieur du filtre | [s] |
| t | Temps | [s] |
| \bar{t} | Temps adimensionné | |
| t_r | Temps pendant lequel les inclusions sont relâchées dans le modèle | [s] |
| T | Taux de filtration | [inc./m ³ lit*s] |
| u_r | Vitesse en direction r | [m/s] |
| u_s | Vitesse superficielle | [m/s] |
| u_z | Vitesse en direction z | [m/s] |
| V_0 | Volume d'une demie ellipse propre | [m ³] |
| V_d | Volume d'une demie ellipse ayant accumulé des inclusions | [m ³] |
| V_{gd} | Volume d'un grain avec déposition | [m ³ grain et inc.] |
| V_{gp} | Volume d'un grain filtrant propre | [m ³ grain propre] |
| V_i | Volume d'une inclusion | [m ³ inc.] |
| V_r | Pourcentage du volume d'inclusions relâchées | [%] |
| z | Profondeur du filtre | [m] |
| \bar{z} | Profondeur adimensionnée | |
| α | Exposant de la courbe de distribution de relâche en écoulement interrompu | |
| β | Ordre du terme de relâche dans le bilan de déposition nette | |
| ε | Porosité | [m ³ vide/m ³ lit] |
| ε_0 | Porosité initiale | [m ³ vide/m ³ lit] |

| | | |
|-----------------------------|--|---|
| ε_d | Porosité de la couche d'inclusions déposées | [m ³ vide /m ³ inc. dep.] |
| ΔV_{slit} | Changement de volume de la section de lit étudiée | [m ³] |
| ΔV_{gf} | Changement de volume d'un seul grain | [m ³] |
| λ_{exp} | Coefficient de filtration expérimental | [1/m] |
| $\lambda_{\text{théo}}$ | Coefficient de filtration théorique | [1/m] |
| μ | Viscosité du fluide étudié | [kg/m*s] |
| v | Débit volumique de fluide (eau) | [m ³ eau/s] |
| σ | Déposition totale des particules dans le filtre (pour toute la plage de temps étudiée) | [inc./m ³ lit] |
| σ_c | Seuil de déposition critique amorçant la relâche des inclusions | [inc./m ³ lit] |
| σ_i | Déposition des particules dans le filtre (pour un temps donné) | [inc./m ³ lit] |
| σ_{ξ} | Volume total des inclusions déposées dans le filtre | [m ³ inc./m ³ lit] |
| $\bar{\sigma}_{\text{exp}}$ | Déposition adimensionnée (données expérimentales) | |
| $\bar{\sigma}$ | Déposition adimensionnée (modèle) | |
| ρ_i | Densité des inclusions | [kg/m ³ inc.] |
| ρ_l | Densité du fluide (eau) | [kg/m ³ fluide] |
| θ | Expression de temps | [s] |

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Préambule

La filtration de l'aluminium liquide, lors du procédé de coulée, est la dernière opération de purification permettant d'éliminer les inclusions solides se retrouvant dans le métal. Cette opération constitue donc l'étape critique du procédé permettant d'éliminer définitivement toutes traces d'impuretés. La filtration de l'aluminium s'effectue à travers un lit d'alumine granulaire dont la granulométrie varie par endroit à l'intérieur de celui-ci. Le mécanisme de la filtration est très complexe et implique des interactions entre la surface filtrante et les inclusions. La filtration est aussi le résultat net entre le dépôt d'inclusions et le relâchement, dans le métal, de ces mêmes inclusions capturées précédemment par le filtre. Le dépôt et le relâchement des inclusions sont habituellement représentés avec des relations empiriques dans les modèles mathématiques. Cependant, la relâche des inclusions est un phénomène peu connu et incompris, peu d'étude ont été réalisées à ce sujet. Il est toutefois possible d'affirmer que le phénomène de relâche des inclusions solides dans le métal est considéré comme un phénomène néfaste à la production de métal de qualité. En effet, les particules entraînées dans l'aluminium liquide, lors de la coulée de ce dernier, prennent part à la microstructure finale du métal et réduisent considérablement sa performance. La taille, la forme et la distribution des inclusions dans le métal, sont en fait le témoin indiquant les performances des centres de coulée appartenant aux alumineries

productrices de ce métal et de ses alliages. Il est, de toute évidence, avantageux d'éliminer ces impuretés puisqu'elles réduisent la fluidité du mélange, augmentent la porosité interne du métal, réduisent les caractéristiques mécaniques du produit, altèrent la qualité de surface, altèrent également la facilité à machiner le produit de métal solide et peuvent également être la source de trous ou de déchirures dans le métal destiné à la production de feuilles minces ou de fils. La relâche des inclusions dans le métal par le filtre a principalement lieu lors des interruptions de coulée mais peut également avoir lieu lors de la filtration en écoulement continu.

Afin de pouvoir identifier le phénomène de relâche associé à ces deux types d'écoulement et puisque la filtration de l'aluminium liquide est un procédé semi-continu, la présente étude tente d'exprimer mathématiquement le phénomène de relâche des impuretés survenant dans un filtre d'alumine tabulaire lors de la filtration en continu et lors de la filtration en écoulement interrompu.

1.2 La filtration de l'aluminium liquide : description du procédé

Comme il a été mentionné précédemment, la filtration de l'aluminium est la dernière étape de purification avant la coulée du métal. La filtration de l'aluminium est de deux différentes natures, soient la filtration dite profonde et la filtration dite gâteau [1]. La filtration de type gâteau est définie par une accumulation en couche toujours grandissante sur la surface du filtre utilisé. Ce type de filtration est plutôt utile lorsque la concentration des inclusions est supérieure à 2000 ppm. Aussi, pour ce type de filtration, la perte de

charge augmente de façon exponentielle avec le temps. Quant à la filtration dite profonde, elle est caractérisée par une accumulation des inclusions à filtrer réparties dans tout le volume qu'occupe le filtre et non seulement à la surface de ce dernier. C'est pour cette raison que ce genre de filtration n'occasionne pas de perte de charge élevée et possède une durée de vie très longue. Ce type de filtration est entre autre performant lorsque la concentration en inclusions est plus faible et est aussi recommandé lorsque le diamètre des inclusions est petit. C'est d'ailleurs ce dernier type de filtration qui est à l'étude dans ce projet puisque le système utilisé en industrie fonctionne grâce à ce genre de filtration. Effectivement, dans les centres de coulée, l'aluminium est mise dans un four afin de la maintenir en fusion et permettre aux plus grosses inclusions de sédimenter. Puis, une fois l'étape de sédimentation ou décantation terminée, le métal passe à travers un procédé de dégazage. Bien que cette étape vise principalement à éliminer l'hydrogène dans le métal, elle permet également de remonter à la surface certains types d'inclusions, tels les inclusions en forme de peaux d'oxydes minces, en les interceptant par les bulles ascendantes d'un gaz inerte qui est injecté. Les inclusions sont ensuite écumées mécaniquement. L'étape de filtration, comme il a été mentionné précédemment, est donc l'étape critique permettant d'éliminer les inclusions ayant résisté aux autres techniques de séparation. Ces inclusions sont généralement de plus petite taille et sont en plus faible concentration dans le métal. L'emploi de la filtration de type profonde dans les centres de coulée est donc justifié.

Selon Clément [2], un exemple de système de filtration d'aluminium liquide est décrit. Celui-ci possède une structure d'acier divisée en deux parties. Les dimensions de cette dernière structure sont d'environ 1.5 m pour la hauteur, de 2.7 m² pour la surface et peut contenir approximativement 2.5 tonnes de métal. La première partie est la chambre de remplissage et la deuxième partie est la section où la filtration s'effectue. Cette dernière section est formée de quelques couches d'alumine tabulaire qui diffèrent dans leur granulométrie. Effectivement, la grosseur des grains de la couche inférieure et de la couche supérieure seront généralement de plus grande taille que la couche servant à la filtration proprement dite. Ces deux couches aideront au maintien de la couche filtrante d'une taille d'environ 3 mm et aideront également à uniformiser le flux de métal passant à travers le lit d'alumine. Le métal est donc envoyé vers la chambre de remplissage pour ensuite être distribué à travers tout le lit d'alumine tabulaire. Voici un schéma du système industriel en figure 1.1. (Il est important de noter que des différences peuvent être observées entre les systèmes existants, (entre autre pour le sens du courant de métal qui peut être inversé), mais les mécanismes de filtration demeurent les mêmes.

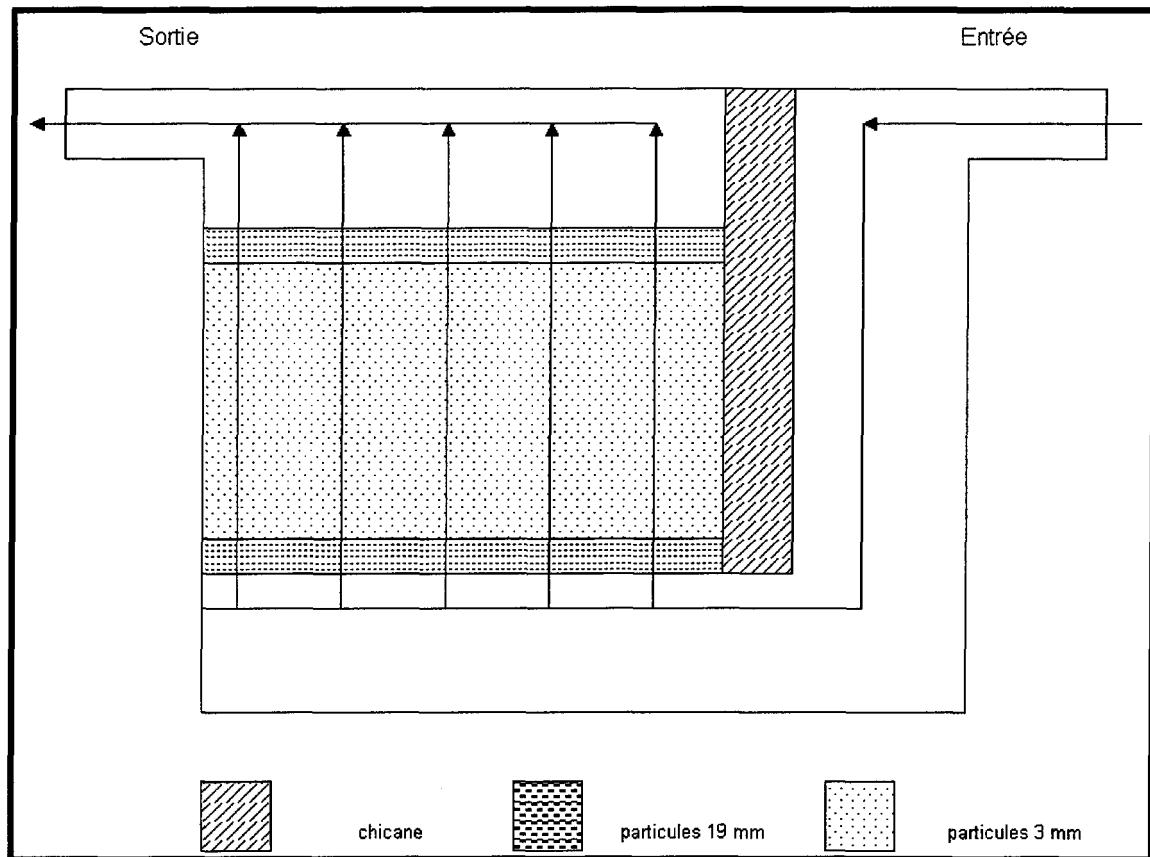


Figure 1.1 : Filtre industriel

Une fois l'aluminium passé à travers ce dernier système, le métal est prêt à être coulé en lingots.

1.3 Travaux antérieurs

De nombreux scientifiques ont étudié le sujet de la filtration dite de type profonde. Comme il a été présenté précédemment, ce type de filtration se caractérise par la capture des inclusions solides à l'intérieur du lit filtrant en opposition à la filtration dite de type

gâteau qui se caractérise par la déposition des inclusions sur la surface d'entrée du filtre. Certains se sont penchés sur l'étude de la filtration de l'eau, d'autres se sont penchés plutôt sur la filtration de métaux en fusion. Dans les deux cas, on tente d'éliminer certaines impuretés solides contenues dans le fluide porteur soit l'eau ou le métal. Des chercheurs se sont penchés sur des études paramétriques afin de développer des relations entre le comportement du filtre et les conditions d'opération alors que d'autres se sont penchés davantage sur l'aspect phénoménologique d'un système de filtration en particulier. Certaines études sont donc tournées davantage sur les paramètres permettant d'augmenter la durée de vie du médium filtrant (travaux orientés sur le procédé) alors que d'autres évaluent plus en profondeur l'efficacité de ce dernier (travaux orientés sur les aspects fondamentaux). Pour les fins de cette recherche, il s'est avéré que les lectures sur l'efficacité des média ont été les plus intéressantes puisqu'il a été possible de retrouver dans ces dernières l'expression du terme de déposition nette des inclusions dans le filtre. Cependant, il est rare que les auteurs considèrent la relâche des inclusions par le filtre, ces derniers se concentrant d'avantage sur le phénomène d'accumulation de ces mêmes inclusions dans le médium souvent de type granulaire.

En 1989, Tien [3] propose un résumé des lectures qu'il a effectuées au cours des dernières années sur la filtration granulaire. Tout un chapitre est consacré à la formulation de l'équation macroscopique permettant d'effectuer un bilan de la déposition nette des inclusions à filtrer dans le lit granulaire fixe. Il est donc possible de comprendre, grâce à cette lecture, que l'accumulation des inclusions déposées dans le filtre augmente en

fonction du temps de filtration. Cette accumulation grandissante change la structure du filtre et affecte ainsi les capacités de ce filtre à capter de nouvelles inclusions. Par conséquent, la concentration de l'effluent et la perte de charge associée à la résistance du filtre à l'écoulement en sont modifiées. Le changement de la qualité de l'effluent et de la perte de charge dans le temps permet d'identifier le comportement dynamique de la filtration granulaire. Le comportement dynamique du filtre peut être alors trouvé en résolvant certaines équations macroscopiques, équations formulées afin de décrire la filtration granulaire. Ces équations sont basées sur le principe de la conservation de la masse et la mécanique d'un écoulement à travers un filtre poreux cylindrique. Un fluide porteur d'inclusions passe donc à travers le lit granulaire d'un rayon R à une vitesse superficielle d'écoulement u_s . Les inclusions à filtrer sont transportées du fluide à la surface des grains filtrants et sont subséquemment déposées sur les grains du filtre par de nombreux mécanismes. La capture des inclusions est le résultat de deux événements séquentiels : le transport de l'inclusion jusqu'au site de capture dans le filtre et l'adhésion de l'inclusion à ce site. Les impuretés se déplaçant grâce au champs gravitationnel dû à la différence de densité entre ces dernières et le métal liquide (la densité des inclusions étant supposée plus élevée que la densité du métal liquide) sont capturées par le filtre par le mécanisme de sédimentation. Ce mécanisme est d'ailleurs considéré comme le mécanisme principal de captation selon Tien [3]. D'autres chercheurs tels Destephen et Choi [4], prétendent que les inclusions de plus de $20 \mu\text{m}$ n'ordonnent qu'aux forces de gravité. Puisque, dans le cadre de cette recherche, les inclusions utilisées en laboratoire sont de plus de $25 \mu\text{m}$, il est légitime de supposer que le mécanisme de sédimentation soit prédominant dans ce cas.

Enfin, une fois que l'inclusion a pris contact avec le filtre, l'équilibre entre les forces de surface, les forces de traînée et la gravité permet de maintenir l'inclusion sur le médium filtrant.

Voici le schéma de la trajectoire de l'inclusion suivant le mécanisme de sédimentation en figure 1.2 :

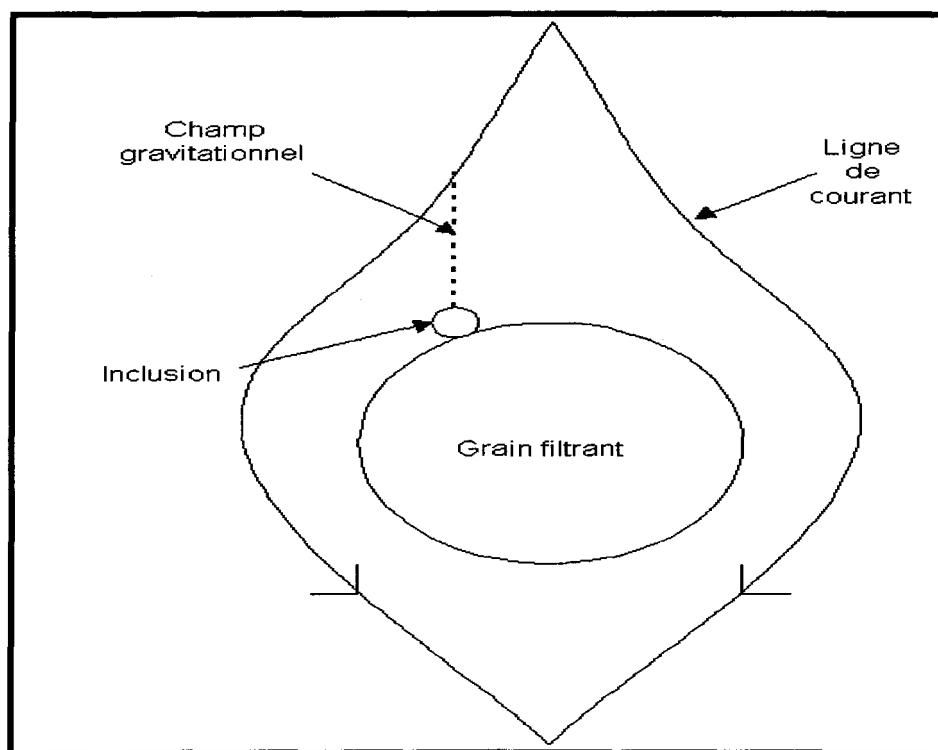


Figure 1.2 : Schéma du mécanisme de sédimentation

Donc, à une distance infiniment petite entre la ligne de courant et le grain filtrant, les inclusions de PVC utilisées expérimentalement sont susceptibles d'obéir majoritairement aux forces de gravité.

Revenons au principe de conservation des impuretés à filtrer afin d'en dégager l'expression principale de la déposition nette, expression qui gouvernera entièrement cette étude.

Le principe de conservation de masse (inclusions) à filtrer se définit donc comme ceci :

$$u_z \frac{\partial c}{\partial z} + u_r \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial(\varepsilon c)}{\partial t} + T - E_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{E_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) = 0 \quad (1.1)$$

où c est la concentration en inclusions dans le fluide, u_z et u_r sont les composantes de vitesse dans les directions z et r en coordonnées cylindriques, E_z et E_r sont les coefficients de dispersion axial et radial respectivement, ε est la porosité, T est le taux de filtration et t est le temps.

Mentionnons que cette équation peut être simplifiée. Effectivement, pour un lit dont les grains possèdent un diamètre relativement plus élevé que la taille des inclusions, l'écoulement peut être considéré unidimensionnel et le profil de vitesse constant. La vitesse en direction radiale est donc négligeable et la seule vitesse considérée est la vitesse en z

(qui peut être exprimée aussi par la vitesse superficielle u_s). De plus, les effets de dispersion sont également négligeables. Voici donc l'équation 1.1 simplifiée :

$$u_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial(\varepsilon c)}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (1.2)$$

Quant au taux de filtration T , il se définit comme le volume d'inclusions capturées par unité volumique de filtre par unité de temps. De façon similaire, la déposition sera définie par le volume d'inclusions déposées par unité de volume du filtre. La relation entre le taux de filtration et la déposition est simple :

$$T = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (1.3)$$

De façon générale, le taux de filtration est dépendant de la profondeur du lit granulaire. Le taux de filtration sera également dépendant de la concentration en inclusions dans le fluide et ainsi que de l'état du filtre. La structure du filtre sera donc altérée par la déposition des inclusions dans le lit granulaire. Ainsi, le changement de porosité sera défini par :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{\sigma_\xi}{1 - \varepsilon_d} \quad (1.4)$$

où ε_0 est la porosité initiale du filtre et ε_d est la porosité attribuée aux inclusions déposées. Cependant la valeur de ε_d ne sera significative que lorsque la déposition le sera elle aussi. Dans cette étude la valeur de ε_d sera maintenue à 0.7 comme Tien, Turian et Pendse l'ont proposé en 1979 [5].

Connaissant donc l'équation simplifiée du bilan de conservation de masse (inclusions) et la valeur de la porosité et en introduisant la valeur de temps θ utilisée par Tien qui se résume à cette expression :

$$\theta = t - \int_0^z \frac{dz}{u_z / \varepsilon} \quad (1.5)$$

aux conditions initiales suivantes, l'expression du bilan devient encore plus simple :

$$u_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} = 0 \quad (1.6)$$

à

$c=0, \sigma=0$ pour $z \geq 0$ et $\theta \leq 0$

$c= c_{in}$ à $z=0$ et $\theta>0$

Les équations 1.3, 1.4 et 1.6, sont les équations qui gouvernent la filtration granulaire. Tien présente également les expressions phénoménologiques proposées par la littérature pour le

taux de filtration. Ainsi, l'expression permettant de décrire la variation de concentration à l'intérieur du filtre en fonction de la profondeur de ce dernier proposée par Iwasaki en 1937 se présente comme suit :

$$\frac{\partial c}{\partial z} = -\lambda c \quad (1.7)$$

Où λ est le coefficient de filtration et c la concentration d'inclusions dans le fluide à l'intérieur du filtre. Selon Rajagopalan et al [6], le coefficient de filtration équivaut à l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{1.5p^3 d_i^2}{d_g} \left(\frac{3(1-p^5)}{(2-3p+3p^5-2p^6) d_g^2} + \frac{g(\rho_i - \rho_l)}{18\mu u_s} \right) \quad (1.8)$$

$$p = (1 - \varepsilon)^{1/3} \quad (1.9)$$

Où d_i et d_g sont les diamètres des inclusions et des grains filtrants respectivement, ρ_i et ρ_l sont la densité des inclusions à filtrer et la densité du fluide étudié et finalement μ est la viscosité du fluide porteur.

À partir de l'équation 1.6, il est possible de dégager l'expression mathématique du taux de déposition. L'expression possède donc la forme suivante :

$$T = \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda u_s c \quad (1.10)$$

Cette expression est cependant incomplète puisqu'elle ne permet l'existence d'aucun phénomène de relâche. Mints a proposer à ce propos en 1951 d'ajouter un terme à l'équation 1.10 afin de permettre ce genre d'éventualité [3] :

$$T = \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda u_s c - A \sigma \quad (1.11)$$

Où A est une constante proportionnelle à la relâche.

Avec l'expression 1.11 il est possible d'affirmer que le taux de filtration est la somme algébrique du taux d'accumulation et du taux de relâche qui lui, serait proportionnel à la déposition. Il est même proposé que le phénomène de relâche pourrait survenir après l'atteinte d'une valeur de déposition critique σ_c . Mentionnons que l'expression du terme de relâche varie selon les lectures. Peu d'investigations ont été effectuées à ce sujet. Voici certaines expressions suggérées par différents auteurs qui ne sont pas présentées dans le recueil de Tien [3] :

En 1989, Adin et Rajapalan [7] présentent deux expressions de relâche dans l'équation de déposition nette selon que le processus de filtration se distinguent par deux différents aspects. En effet, si les forces de surface dominent lors de la déposition Adin et Rajapalan proposent que le bilan de déposition nette prennent la forme suivante :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = k_1' c - \frac{k_1' c_0}{\sigma_c} \sigma \quad (1.12)$$

Où k_1' est une constante proportionnelle à la concentration pour le terme d'accumulation et la relâche tient compte d'un état critique de déposition (σ_c).

Dans un autre cas, lorsque la vitesse d'écoulement à travers le filtre demeure constante, la matière solide qui doit être filtrée s'accumule dans les pores et cause une hausse constante de la perte de charge. Cette perte de charge provoque, par le fait même, une hausse des forces hydrodynamiques qui favorise le détachement des particules déjà déposées. Les auteurs proposent donc, dans ce cas, l'équation de déposition nette suivante :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \left[k_1'' v c (F - \sigma) \right] - \left[k_2' \sigma J \right] \quad (1.13)$$

Où K_1'' est le coefficient d'accumulation et K_2' est le coefficient de relâche, vC dépend du flux d'inclusions, $(F-\sigma)$ relève de la surface disponible pour que les inclusions collent aux grains filtrants et J est le gradient hydraulique relié aux forces hydrodynamiques.

En l'an 2000, Kocae, Bui et Waite [8] présentent un modèle mathématique deux dimensions pour représenter le comportement dynamique du filtre d'alumine tabulaire. Ce modèle a été construit à l'aide du simulateur d'écoulement CFX 4.3 TM. Ainsi selon ces auteurs, pour obtenir des résultats semblables à ceux observés en industrie, l'expression de déposition nette a la forme suivante :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda u_s c - k_2'' \sigma^\beta \quad (1.14)$$

Où l'accumulation est proportionnelle à λ qui est le coefficient de filtration, u_s qui est la vitesse superficielle et c qui est la concentration des inclusions dans le fluide et où la relâche est proportionnelle au coefficient de relâche K_2'' et à la déposition totale élevée à la puissance β .

Quant aux auteurs qui ont tenté de se concentrer sur l'expression d'accumulation des inclusions sur les grains filtrants, il est possible, dans le recueil de Tien [3], de retrouver certaines théories.

Si l'évolution du coefficient de filtration augmente de façon constante, c'est à dire que la déposition favorise l'accumulation des inclusions subséquentes, Iwasaki (1937) propose que l'évolution du rapport du coefficient de filtration sur le coefficient de filtration initial (λ/λ_0) (lié au terme d'accumulation dans le bilan de déposition nette) soit égal à :

$$\lambda/\lambda_0 = 1 + B\sigma \quad (1.15)$$

où B est un paramètre ajustable et σ est la déposition totale.

Par contre, si la déposition n'est pas favorisée, c'est à dire qu'il y a diminution de la valeur du coefficient du filtration tout au long du processus, Ornatski et al (1955) et Mehter et al (1970) proposent plutôt que le rapport λ/λ_0 soit égale à :

$$\lambda/\lambda_0 = 1 - B\sigma \quad (1.16)$$

Certains auteurs comme Shekhtman (1961) ou Heertjes et Lerk (1967) proposent plutôt que ce même rapport λ/λ_0 soit équivalent à :

$$\lambda/\lambda_0 = 1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (1.17)$$

où ε_0 est la porosité initiale. Dans ce cas-ci, les auteurs supposent que la porosité du filtre changera considérablement avec l'évolution de la déposition totale.

Il est donc possible de remarquer les nombreuses différences entre les définitions des termes d'accumulation et de relâche. En effet, les études ne sont pas toutes effectuées dans les mêmes conditions. De plus, les études ne sont pas toutes effectuées pour traiter le cas de la filtration de l'aluminium. Certaines sont pour l'eau et d'autres pour des aérosols. L'expression mathématique du phénomène de relâche lors de la filtration de l'aluminium demeure encore à ce jour peu connue, la représentation de ce phénomène dans les modèles est, jusqu'à présent, purement hypothétique et le moment où ce phénomène intervient dans le processus de filtration l'est tout autant (la lacune est d'autant plus flagrante lors d'une interruption de l'écoulement).

D'autres chercheurs tels Eckert Miller, Apelian et Mutharasan ont tenté de présenter [9] les principes fondamentaux de la filtration à travers un médium poreux. On définit entre autre que la relâche peut survenir de deux façons. En effet, la relâche peut être attribuée à un arrêt suivi d'un nouveau départ d'écoulement ou lorsque que la concentration en inclusions de l'effluent augmente lors d'un flux continu. Il est cependant mentionné que les opinions sur l'existence du phénomène de relâche sont controversées. Selon ces auteurs, la manifestation de ce phénomène semble être étroitement reliée au système de filtration étudié par le chercheur. En effet, certains de ces chercheurs croient que la relâche n'existe sous aucune condition, alors que d'autres maintiennent qu'elle survient lors d'une

augmentation du débit passant à travers le filtre étudié ou tout simplement lors d'une interruption de l'écoulement ou bien encore, qu'elle se manifeste lorsque la vitesse interstitielle du fluide à l'intérieur du filtre dépasse un seuil limite. Pour cette étude, les efforts sont donc dirigés afin de vérifier si la relâche existe bel et bien en écoulement continu et en écoulement interrompu.

De plus, en 1993, Moran et al.[10] effectuent une recherche permettant d'identifier, lors de la filtration d'eau potable, les paramètres d'opération (vitesse de l'affluent, profondeur du lit filtrant, taille des grains filtrants, granulométrie des inclusions à filtrer et contenu en inclusions de l'affluent) susceptibles de favoriser l'accumulation d'inclusions à l'intérieur du filtre de même que les paramètres d'opération (vitesse de l'affluent, profondeur du lit filtrant, taille des grains filtrants, granulométrie des inclusions à filtrer et contenu en inclusions de l'affluent) affectant le détachement de ces mêmes inclusions du lit granulaire.

Moran et al. tentent d'effectuer deux types d'expériences. Le premier type étant d'opérer une filtration de façon continue pendant plusieurs heures (≥ 48 heures) soumis à un affluent dont la concentration en inclusions est stable. Les valeurs de concentration des effluents pour certaines profondeurs du lit filtrant sont recueillies. Grâce à ce type d'expérience, il est possible d'apprendre que l'efficacité de filtration augmente lorsque la longueur du lit est plus élevée, lorsque la taille des grains filtrants est plus petite et que l'efficacité de filtration diminue lorsque la vitesse de l'écoulement (le débit) augmente. Ce sont tous ici des paramètres aidant ou nuisant à la déposition des inclusions.

De ces expérimentations, il a été possible pour Moran et al. d'identifier deux comportements distincts; le premier étant l'augmentation de l'efficacité de filtration dans le temps et le deuxième étant sa diminution, comportement associé à la relâche. Moran et al. stipulent que l'augmentation de l'efficacité de la filtration dans le temps et la relâche des inclusions précédemment filtrées ne sont pas nécessairement deux étapes distinctes dans le processus de filtration et que la présence de ces deux phénomènes est intimement liée à la taille des inclusions. Après l'exécution de ce premier type d'expérience, qui a permis de percevoir l'effet de la relâche lors du processus de filtration, Moran et al. tentent, par une deuxième série d'expériences, de découvrir à quel moment ce phénomène de relâche intervient dans le processus de filtration et quels paramètres favorise ce dernier. Ce deuxième type d'expérience est donc caractérisé par l'étude de la réponse du filtre à un affluent libre de toutes inclusions après avoir servi d'accumulateur dans la première série d'expériences. Ainsi, les données d'effluent recueillies ont démontré que même si l'affluent est propre, le filtre relâche certaines des inclusions capturées précédemment puisque la concentration des effluents est plus élevée que la concentration de l'affluent. Pour Moran et al, la relâche existe donc vraiment lors du processus de filtration en continu. Ces chercheurs prétendent que la relâche est plus fréquente pour les inclusions de grande taille (supérieur à 1.4 μm) et que de petites inclusions peuvent s'agglomérer pour ensuite se détacher du filtre.

Moran et al. ont tenté également d'établir une relation entre la quantité d'inclusions indésirables accumulées dans le filtre et la relâche. En effet, selon eux, il était plausible d'associer la quantité d'inclusions accumulées avec la quantité de relâche observée. Ainsi,

la déposition totale a été calculée pour toute la durée de la filtration en effectuant la différence entre la concentration de l'affluent et la concentration de l'effluent pour une section du filtre intégrée sur toute la durée de filtration. Le fait que la déposition diminue avec le temps permet de croire que cette diminution est attribuable à la relâche des inclusions déjà déposées auparavant. Ainsi, pour Moran et al., la diminution de la déposition est signe de relâche dans le procédé de filtration. L'interprétation de leurs résultats à permis de voir que plus le pore est occupé par les inclusions, plus la relâche est significative. Finalement, de tous les paramètres considérés lors de cette étude, l'importance de l'accumulation a été identifiée comme étant un facteur déterminant pour qu'il y ait présence de relâche.

Également en 1996, Destephen et Choi [4] propose un modèle simulant la filtration d'un liquide à travers un matériau fibreux en se servant de la méthode Monte Carlo. Ce modèle est le premier du genre à tenir compte de la relâche des inclusions à filtrer. Dans cette étude, plusieurs mécanismes et interactions ont été considérées. Les inclusions trop grosses pour entrer dans les pores, les inclusions capturées par les pores de plus en plus bloqués, les inclusions capturées par les fibres du filtre et la relâche des inclusions sont tous autant de phénomènes considérés dans le modèle. L'algorithme utilise une fonction permettant d'obtenir des nombres aléatoires pour déterminer si l'inclusion sera capturée ou relâchée par le filtre par un quelconque mécanisme. L'exercice est répété jusqu'à ce que toutes les inclusions entrent dans le filtre. De cette façon, l'efficacité du filtre est évaluée pour différentes conditions telles la grosseur du pore du filtre et la grosseur des inclusions

filtrées. Selon les auteurs, la représentation du phénomène de relâche dans le modèle est somme toute assez primaire, basée sur un principe de vitesse limite de capture. Ils concluent en affirmant que ce phénomène de relâche nécessite une meilleure compréhension afin de pouvoir le représenter de la façon la plus juste possible.

En 1997, au Centre de recherche et de développement Arvida d'Alcan, Chapdelaine [11] a effectué une étude avec le même montage expérimental qui a servi à ce présent projet d'étude. Les investigations se concentraient spécifiquement sur la première partie de l'équation du bilan de déposition proposé par Tien. L'hypothèse principale étant que le phénomène de relâche n'existe pas pour un écoulement d'une durée de 2 heures vu la trop faible quantité d'inclusions déposées durant cette période. L'étude a permis de vérifier si, par expérience, il était possible d'obtenir grâce aux données de concentrations recueillies, le coefficient de filtration calculé de façon théorique. Les résultats obtenus par Chapdelaine sont concluants. Effectivement, il est possible de calculer d'après les résultats de concentration obtenus du montage expérimental la valeur du coefficient de filtration par la formule suivante qui stipule que la concentration en inclusions à la sortie du filtre suit une loi exponentielle pour les premiers instants du processus :

$$\frac{C_{sortie}}{C_{entrée}} = e^{-\lambda L} \quad (1.18)$$

ou

$$\lambda = \frac{-\left(\ln\left(\frac{C_{\text{sortie}}}{C_{\text{entrée}}} \right) \right)}{L} \quad (1.19)$$

où L est la longueur du lit filtrant.

Cette formule n'est valide par contre que pour le début du processus de filtration, lorsque la relâche n'est pas présente, comme le stipule l'hypothèse de l'étude effectuée par Chapdelaine.

Toujours en 1997, Mahmood et al [12] effectuent une étude principalement sur l'adhésion et le détachement des inclusions de kaolite sur un lit de billes de verre afin d'observer l'impact du changement des conditions chimiques du fluide porteur. Cette étude est de type microscopique puisqu'elle évalue principalement l'effet des changements de conditions chimiques sur les forces d'attraction et de répulsion entre les inclusions de kaolite et les particules de verre constituant le filtre. Les forces hydrodynamiques ont été gardées constantes. Mentionnons également que l'étude sur le détachement des inclusions s'est limitée à la quantité d'inclusions de kaolite relâchées lors d'un écoulement inverse passant à travers le filtre (backwash). Cette étude est peu ressemblante à celle présentée dans ce présent ouvrage vu l'emphase mis sur l'aspect microscopique du phénomène et vu la différence au niveau des procédures expérimentales. Cependant, une revue fort intéressante des forces contrôlant la relâche a été exécutée par cet auteur et est présentée dans les lignes qui suivent.

Il est donc mentionné que les forces qui contrôlent la relâche des inclusions d'un substrat quelconque sont de type physico-chimiques telles les forces hydrodynamiques, les forces colloïdales et les forces de gravité. (Considérant les expérimentations effectuées dans cet ouvrage, une attention particulière sera portée aux descriptions des forces hydrodynamiques, qui sont en fait, dans le cadre de cette étude, les seules forces considérées avec les forces de gravité.)

Mahmood et al stipulent donc que les forces hydrodynamiques sont de deux types : les forces de traînée et les forces de poussée. Les forces visqueuses donnent naissance au forces de traînée alors que les forces de poussée naissent de la différence de pression entre le dessous et le dessus de l'inclusion, différence qui provient de conditions plutôt stables sous l'inclusion et d'une certaine succion située au dessus de l'inclusion qui chute dans un milieu quelconque.

Mahmood et al affirment que le détachement ou la relâche des particules de kaolite augmente substantiellement (de 25% à 80%) lorsque la vitesse interstitielle augmente (de 25% à 100%) alors que tous les autres paramètres de type chimique restent constants. Cependant, sous un écoulement stable en régime permanent, les forces hydrodynamiques ont été qualifiées de très petites n'apportant pas de contribution significative à la relâche (McDowell-Boyer, 1992). D'après cette affirmation, il sera définitivement intéressant d'observer, grâce aux expérimentations effectuées pour ce travail, l'effet d'un plus grand

débit de fluide et d'un arrêt momentané d'écoulement sur la relâche en comparaison avec un écoulement continu aux conditions standard.

Aussi, en l'an 2000, Kocafe, Bui et Waite [8] présentent un modèle mathématique deux dimensions simulant la filtration de l'aluminium liquide. Ce modèle a été construit grâce au logiciel de simulation des écoulements CFX 4.3 TM. Cette approche de modélisation dite macroscopique permet d'analyser le comportement global du filtre sous différentes conditions à l'aide des lois de conservations de masse et de momentum. Une fois de plus cette étude a permis de relever les tendances d'efficacité du filtre sous certaines conditions.

Puisque cette dernière compare les résultats obtenus en simulation à ceux obtenus en usine, il est permis alors de se servir de celle-ci comme base de comparaison avec les résultats obtenus dans les laboratoires du GRIPS. Il est possible d'apprendre par cette lecture que l'efficacité de filtration diminue lorsque la vitesse de l'écoulement (le débit) augmente et que l'efficacité augmente lorsque la concentration à l'entrée augmente comme ce qu'il a été présenté par Moran et al quelques années auparavant. Finalement, cette étude vérifie l'impact de la taille des grains filtrants sur l'efficacité de filtration puisque le filtre modélisé est composé de plusieurs couches de grains filtrants de différents diamètres. Il en résulte une meilleure efficacité pour les couches composées de grains filtrants de plus petite taille.

Finalement, en 2001, Kiss, Bui, Kocafe, Fortin et Waite [13] étudient l'influence de plusieurs géométries de grains filtrants. Le comportement des lignes de courant du fluide parcourant l'intérieur de la structure imitant le filtre a été étudié grâce à des techniques

qualitatives visuelles et grâce à des techniques quantitatives à l'aide des méthodes LDV et PIV. L'étude s'est effectuée dans un modèle physique de forme cubique à travers lequel il est possible d'observer le comportement d'inclusions de PVC s'écoulant dans de l'eau. À l'intérieur du cube, afin d'étudier en deux dimensions l'effet de la géométrie des grains filtrants, les auteurs ont choisis d'étudier des cylindres (qui, en deux dimensions représentent des particules filtrantes sphériques) des prismes rectangulaires et des demi-lunes. Fait intéressant à noter, les auteurs peuvent très bien identifier la présence de relâche lors d'arrêt et de départ de l'écoulement. L'étude ne tente cependant pas de déterminer l'expression cinétique de la déposition et de la relâche en écoulement continu et interrompu.

1.4 Positionnement de la démarche

L'étude présentée se divise en deux parties distinctes. La première partie étant expérimentale sert à l'étude paramétrique permettant de déterminer les conditions favorisant l'accumulation des inclusions et minimisant la relâche de ces mêmes inclusions en écoulement continu et en écoulement interrompu. Cette première partie de l'étude permet également de générer des courbes de concentration d'inclusions dans le fluide porteur (inclusions de PVC dans l'eau) à l'entrée du filtre et à la sortie du filtre. Ces courbes serviront ensuite d'outil pour valider le modèle élaboré de déposition nette, modèle qui constitue la deuxième partie de l'étude. Il apparaît donc important, à ce moment, d'établir les comparaisons entre le filtre industriel servant à la filtration de l'aluminium et le montage expérimental utilisé dans cette étude afin d'en justifier son utilisation et afin de

démontrer la crédibilité du modèle obtenu quant à sa concordance au procédé réel de filtration de l'aluminium en ce qui a trait au bilan de matière associé.

Essentiellement le montage expérimental est constitué d'une colonne de 27.94 cm de diamètre, utilisant l'eau comme fluide porteur et le PVC pour reproduire les inclusions solides. Les inclusions de PVC possèdent un diamètre moyen de 25 μm . Le médium filtrant est l'alumine tabulaire mesurant entre 1.5 et 3 mm de diamètre pour le cas de base. Ce médium filtrant est le même que celui qui est utilisé dans les filtres industriels qui servent à la filtration de l'aluminium (le fonctionnement du système est présenté plus en détails au chapitre 2). Le texte qui suit présente les comparaisons entre différents aspects du montage expérimental et du système réel de filtration afin de relever leurs similitudes.

1.4.1 Du point de vue des inclusions

Puisque selon Tien [3], le mécanisme de sédimentation est le mécanisme principal survenant lors de la filtration, il est nécessaire de comparer les vitesses terminales de chute libre (vitesse de sédimentation) de l'inclusion lorsque cette dernière se détache de la ligne de courant et se dépose sur le grain filtrant comme il est présenté à la figure 1.2. Ainsi la vitesse de sédimentation des inclusions dans l'aluminium liquide et des inclusions de PVC dans l'eau est la même et est exprimée pour le régime de Stoke par :

$$u_t = \frac{d_i^2 g (\rho_i - \rho_l)}{18 \rho_l \mu} \quad (1.20)$$

où d_i est le diamètre de l'inclusion, ρ_i et ρ_l sont la densité des inclusions et du liquide respectivement et μ est la viscosité cinématique du liquide.

Ainsi, selon Chapdelaine [11] la vitesse terminale de chute libre pour une inclusion de 22.5 μm de MgO dans l'aluminium à 700°C est de 0.111 mm/s et une inclusion de PVC également de 22.5 μm dans l'eau à 25°C est de 0.118 mm/s. Ces deux vitesses de sédimentation sont donc comparables.

1.4.2 Du point de vue du fluide

L'eau à 25°C et l'aluminium en fusion à 700°C possèdent une viscosité cinématique semblable. La viscosité cinématique exprimée par le rapport de la viscosité sur la densité du liquide est de 1.005E-06 m^2/s pour l'eau et de 1.300E-06 pour l'aluminium. Encore une fois ces deux aspects peuvent être qualifiés de semblables.

De plus, la vitesse d'écoulement de l'eau dans la colonne du système expérimental est de 1.8 mm/s. L'aluminium s'écoule également à une vitesse semblable pour le contexte industriel.

En ayant donc le même médium granulaire et les mêmes caractéristiques au niveau du mélange (vitesse de sédimentation des inclusions, vitesse d'écoulement et caractéristiques hydrodynamiques), il est possible d'affirmer que les résultats obtenus de la partie

expérimentale de l'étude sont fiables et représentatifs de la situation industrielle pour la filtration de l'aluminium pour le bilan net des inclusions retenues par le filtre (mentionnons que le modèle ne tient pas compte d'interactions entre le métal, les inclusions et le lit filtrant).

1.5 Contribution de la présente étude à la recherche

1.5.1 Objectif général

Le présent travail vise à comprendre fondamentalement le phénomène de relâche lors de la filtration de l'aluminium. Plus précisément, l'étude suivante vise à identifier la présence du phénomène de relâche lors de la filtration d'eau chargée d'inclusions de PVC imitant l'aluminium en fusion contenant des inclusions solides. Une fois identifié, le phénomène de relâche sera exprimé et quantifié mathématiquement. L'expression mathématique de la relâche est recherchée pour deux types d'écoulement : l'écoulement continu et l'écoulement interrompu.

1.5.1.1 Objectifs spécifiques

Effectuer une étude paramétrique lors de la filtration en écoulement continu et en écoulement interrompu afin de déterminer les paramètres d'opération favorisant l'accumulation d'inclusions et minimisant la relâche. Les paramètres étudiés sont :

- La taille des grains filtrants (1.5-3 mm, 3-6 mm et 6-12 mm)
- La vitesse de l'écoulement (u_s) (1.8 mm/s et 3.6 mm/s)
- La concentration d'inclusions à l'entrée du système
(100 000 inc/kg eau, 175 000 inc/kg eau et 700 000 inc/kg eau)

Développer un modèle cinétique de la déposition et de la relâche en écoulement continu et en écoulement interrompu lors du processus de filtration grâce aux courbes de concentration obtenues de la partie expérimentale de l'étude en effectuant un bilan de masse autour du filtre étudié exprimé par l'équation 1.2.

1.5.2 Avancement

Une attention particulière est portée sur l'écoulement de type interrompu puisque, d'après la revue de littérature effectuée, il est possible d'affirmer qu'aucune donnée expérimentale de qualité d'affluent et d'effluent n'a été recueillie pour ce type d'écoulement. C'est pourtant, dans le cas de la pratique de la filtration et de la coulée de l'aluminium, l'aspect le plus problématique. Puisque la filtration de l'aluminium liquide est un procédé semi-continu, la relâche est facilement observable lors d'interruption de coulée en usine.

Aussi, grâce aux courbes expérimentales, il est possible d'effectuer certaines simulations permettant de prédire le comportement d'un écoulement sous certaines conditions

d'opération et, par le fait même, de connaître les expressions cinétiques d'accumulation, de relâche en continu et de relâche en interrompu associées aux phénomènes.

Finalement, puisque le phénomène de relâche est peu compris et peu connu, les découvertes effectuées à ce sujet à l'aide du modèle expérimental utilisant l'eau comme fluide porteur aideront à la compréhension des événements observés lors du procédé de filtration de l'aluminium. Elles permettront également de déterminer les paramètres d'opération susceptibles de minimiser la présence de ce phénomène lors des coulées de métal, phénomène, qui, rappelons-le, affecte grandement la qualité du métal produit en usine.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DU MONTAGE EXPÉRIMENTAL ET DES MÉTHODES D'ANALYSE

2.1 Introduction

Le présent chapitre décrit le montage expérimental utilisé lors de la réalisation des expériences de cette étude. Cette description présentera le montage de façon détaillée et, par la suite, décrira individuellement chaque essai réalisé. Enfin, les méthodes d'analyse des résultats seront expliquées afin de permettre une meilleure compréhension de l'interprétation de ceux-ci.

2.2 Montage expérimental

La description du montage expérimental est ici nécessaire afin de connaître le fonctionnement de ce dernier et saisir les entités mesurables et les manipulations sur les paramètres d'opération qui sont possibles et réalisables. Ce montage, ayant déjà appartenu au Centre de recherche et de développement Arvida d'Alcan [11,14], a été quelque peu modifié. Voici donc une description revue et corrigée du montage utilisé pour cette étude à la figure 2.1.

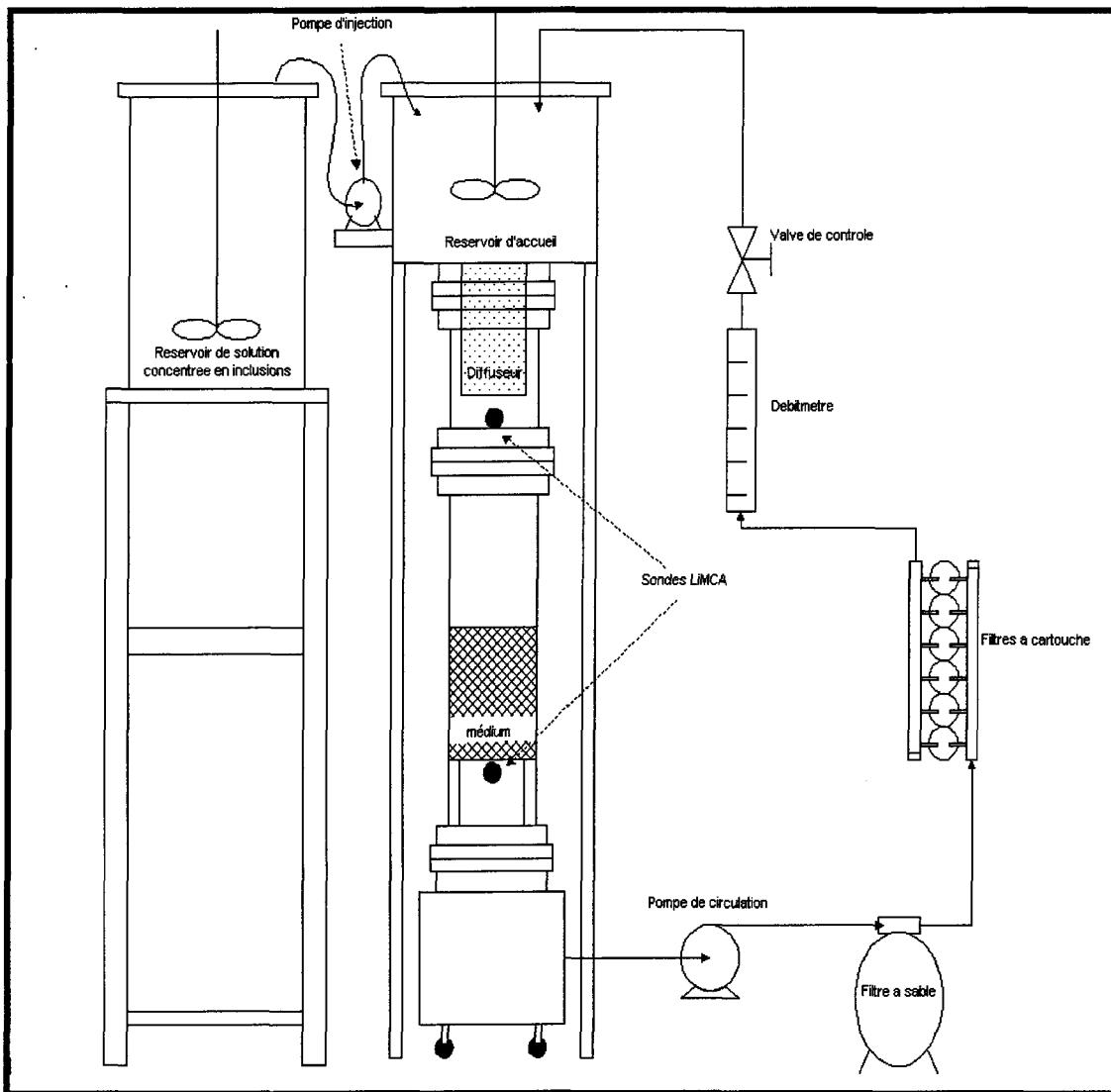


Figure 2.1 : Montage expérimental

2.2.1 Description du montage

Le montage utilisé est constitué en fait d'une colonne possédant un diamètre de 27.94 cm dans lequel le médium filtrant est inséré. Cette colonne offre donc une ouverture permettant de changer le médium filtrant étudié. Un réservoir de solution concentrée en inclusions de PVC sphériques (voir figure 2.2), dont le diamètre moyen est de 25 μm , est

agité continuellement et une quantité connue de cette solution est déversée dans le réservoir d'accueil de la colonne filtrante. Ce montage utilise l'eau comme fluide porteur puisque l'eau possède une viscosité cinématique dont l'ordre de grandeur est semblable à la viscosité cinématique de l'aluminium en fusion. Ainsi, l'eau imite donc le comportement hydrodynamique du métal. En effet, la viscosité cinématique de l'eau est de $1.005\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{s}$ ($T \approx 25^\circ\text{C}$) et la viscosité cinématique de l'aluminium est de $1.300\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{s}$ ($T \approx 700^\circ\text{C}$) aux conditions d'opération utilisées. Ce qui est comparable. L'eau contenant les inclusions sphériques circule donc de haut en bas dans la colonne filtrante. Le diffuseur situé à la suite du bassin d'accueil tente de répartir les inclusions afin qu'elles ne choisissent un chemin préférentiel quelconque et aide à l'écoulement laminaire en minimisant les turbulences. Ce diffuseur a pour but également d'uniformiser le mélange dans toute la section de la colonne. Une fois passé le diffuseur, le mélange d'eau et d'inclusions atteint la première sonde LiMCA mesurant la concentration des inclusions à l'entrée du filtre. Le mélange chargé d'inclusions sphériques de PVC atteint donc par la suite le filtre d'alumine tabulaire afin d'être traité. La taille moyenne des morceaux d'alumine se situe entre 1.5 et 3 mm pour les conditions standard. C'est ce lit constitué d'alumine tabulaire qui sera étudié à certaines hauteurs afin de déterminer l'impact de ce paramètre sur l'efficacité de filtration pour une période d'environ 7 heures (la configuration du montage ne permettant pas de période plus longue). D'autres tailles de grains filtrants sont à l'étude, notamment les grains de diamètre 3-6 et 6-12 mm. Ensuite, le mélange d'inclusions de PVC filtré atteint la deuxième sonde LiMCA afin que celui-ci soit échantillonné pour fins d'analyse de concentration (teneur en inclusions de PVC dans l'eau) (ces données de concentration permettront d'évaluer

l'efficacité du lit filtrant étudié). Cette sonde se situe immédiatement à la sortie du filtre. Par la suite, le mélange ayant été filtré, continue sa trajectoire afin d'être pompé et dirigé vers un premier filtre à sable permettant d'éliminer les plus grosses inclusions ayant échappé au lit d'alumine tabulaire. Une fois cette étape achevée, le flux d'eau se dirige vers six filtres à cartouche de 1 μm afin d'éliminer les dernières traces d'impuretés (inclusions) pouvant encore exister à cette étape. Finalement, l'eau libre de toutes inclusions, retourne au haut de la colonne en étant régulée par un débitmètre d'une capacité de passage maximale de 600 litres par heure. Voici l'image des inclusions de PVC utilisées pour le mélange eau/inclusions (figure 2.2).

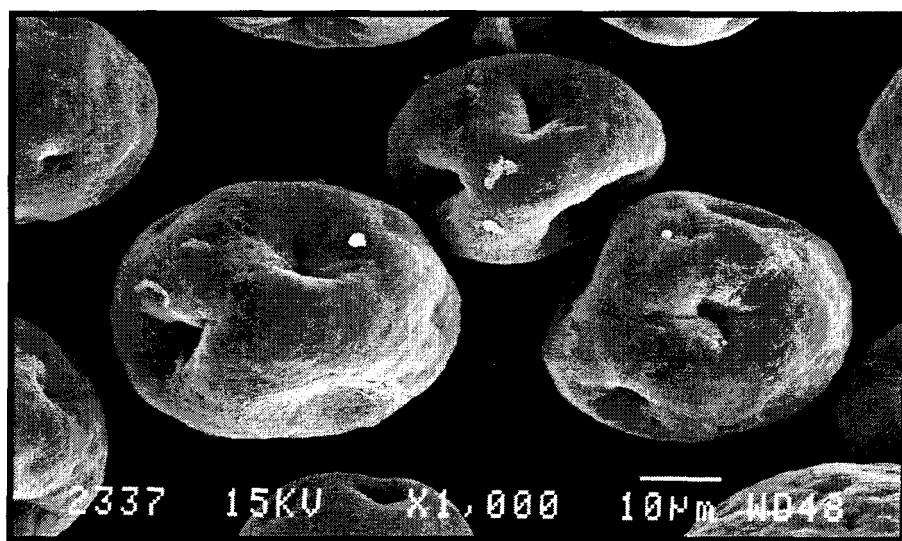


Figure 2.2 : Inclusions sphériques de PVC

2.2.2 Description de l'instrumentation

Il est nécessaire ici d'insister sur le fonctionnement des sondes LiMCA présentées précédemment puisque ces sondes constituent l'outil permettant de dénombrer le nombre d'inclusions de PVC par kilogramme d'eau. Ces sondes utilisent donc une méthode électrique afin de déterminer la concentration des inclusions dans le fluide. Ces sondes sont constituées d'électrodes de laiton. Une des électrodes est contenue dans une éprouvette de verre percée d'un trou de 300 µm reliée à un appareil de dosage permettant l'acquisition d'échantillons du mélange étudié (l'échantillonnage est cyclique, il y a alternance entre l'échantillonnage d'entrée et de sortie du filtre à chaque minute i.e. il y a un échantillon par minute). Quant à l'autre électrode, elle est laissée libre dans le mélange d'eau et d'inclusions de PVC. Le principe de fonctionnement de cet instrument est de compter une à une les inclusions de PVC comprises dans le volume d'eau aspiré par l'appareil de dosage, relié au tube de verre par un système de valve électrique. En effet, en aspirant une certaine quantité d'eau dans l'orifice de l'éprouvette, et en faisant passer un courant électrique entre les deux électrodes, il est possible de détecter le passage d'une inclusion par le changement de résistance au courant électrique qu'elle provoquera puisque l'eau a été salée préalablement. Aussi, l'amplitude de ce changement est proportionnelle à la taille de l'inclusion. La résistivité électrique des inclusions de PVC est supérieure à celle de l'eau contenant 5 g/L de NaCl. C'est donc en supposant que le nombre et la taille des inclusions échantillonnées expriment la réalité du caractère du mélange que la concentration de ce dernier est connue. Puisque le passage d'une inclusion entre les deux électrodes

n'occasionnera qu'une très faible différence de voltage, il est nécessaire que le montage soit muni de préamplificateurs à la sortie du signal prêt à être analysé. Voici le schéma d'une sonde LiMCA en figure 2.3

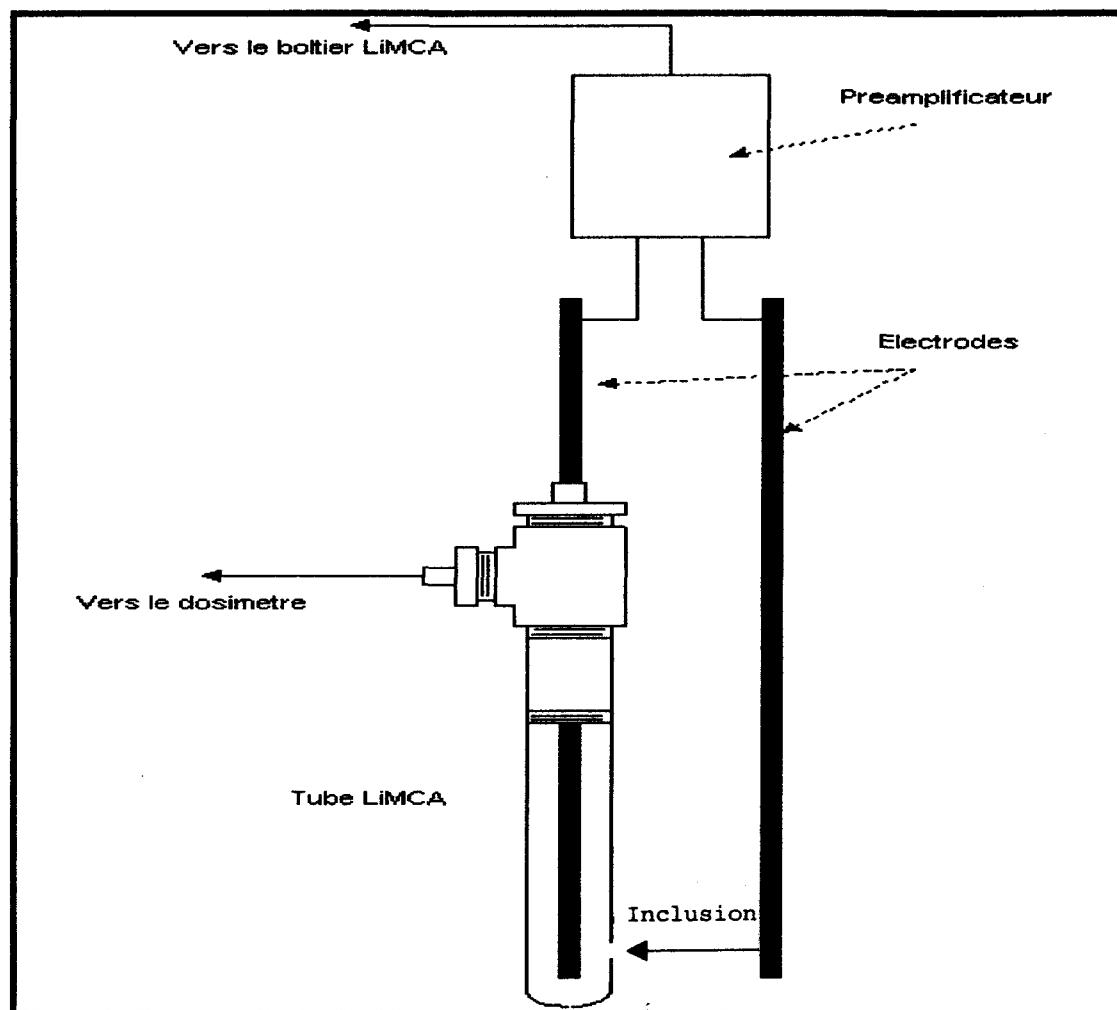


Figure 2.3 : Schéma de l'instrumentation

2.2.2.1 Calibrage de l'instrumentation

Puisque l'évaluation de la déposition s'effectuera pour la granulométrie de 20-25 μm calculée par le système d'acquisition (le bruit étant trop élevé pour évaluer la déposition pour les granulométries supérieures i.e. le nombre des inclusions plus grandes que 25 μm est trop faible pour l'exactitude de l'appareil de mesure), il est nécessaire de s'assurer de la justesse de l'ensemble formé des électrodes et du préamplificateur. Le calibrage s'effectue donc dans un contenant rectangulaire permettant l'insertion de l'électrode contenue dans le tube de verre et de l'électrode libre. Ce contenant est alors disposé sur une plaque agitatrice. De l'eau déminéralisée, filtrée, contenant 5 g/L de NaCl de table, permettant le passage du courant entre les deux électrodes de métal est introduite dans le contenant afin que les électrodes y baignent. Des billes de verre dont la taille est de 40 μm sont alors ajoutées à l'eau. Connaissant la taille des particules introduites dans l'eau salée, il est possible de vérifier la granulométrie observée par le préamplificateur et, par le fait même, leur répartition statistique autour de la taille témoin des billes introduites. Il est possible de prendre connaissance des résultats de cette étape de calibrage en annexe 1.

2.3 Description des essais réalisés

À partir de la littérature [10], il a été possible d'imaginer une configuration de prise de mesure permettant de recueillir des concentrations pour certaines épaisseurs de lit sélectionnées. À noter que la hauteur des lits est donnée en pouces puisque c'est ce système d'unités qui est utilisé dans l'industrie. Cette configuration propose donc de recueillir séparément pour des épaisseurs de 1, 2, 3 et 4 pouces, l'évolution de la concentration à la

sortie du filtre d'alumine tabulaire pour une durée de 7 heures. La hauteur maximale expérimentée est de 4 pouces, hauteur nécessaire pour obtenir 95% d'efficacité pour les conditions standard (vitesse superficielle utilisée en usine de 1.8 mm/s, concentration à l'entrée de 100 000 inclusions par kilogramme de fluide et grosseur des grains du lit filtrant de 1.5 à 3 mm). Ces conditions d'opération sont celles que l'on retrouve en usine. Quant aux essais en arrêt, l'écoulement sera interrompu pendant 5 minutes après 200 minutes de filtration pour ensuite être redémarré. La prise de mesure sera, quant à elle, continue.

Il est donc possible, avec les données de concentration obtenues, de déterminer le taux de relâche des inclusions de PVC dans le filtre. L'expérimentation est constituée de deux parties. En effet, on observe la relâche lors de la filtration continue (écoulement continu) et lors des arrêts de coulée (écoulement interrompu). Le phénomène de relâche est donc étudié pour ces deux états du procédé. Les effets de la concentration initiale d'inclusions à l'entrée du filtre, de la vitesse d'écoulement et de la taille des grains filtrants sont étudiés pour la relâche en continu ainsi que pour la relâche des inclusions de PVC en écoulement interrompu. Voici le plan expérimental adopté :

Tableau 2.1 : Plan expérimental

| Écoulement continu pendant 7 hres pour 1, 2, 3 et 4 pouces de lit | | | | | |
|--|---------|---------|----------|---------|---------|
| serie | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| vitesse (mm/s) | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 3.6 | 1.8 |
| média (mm) | 1.5-3.0 | 3.0-6.0 | 6.0-12.0 | 1.5-3.0 | 1.5-3.0 |
| conc.(milliers inclusions/kg) | 100 | 100 | 100 | 100 | 175 |
| Écoulement interrompu 5 min. après 200 min. de filtration pour 1, 2, 3 et 4 pouces de lit | | | | | |
| serie | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| vitesse (mm/s) | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 3.6 | 1.8 |
| média (mm) | 1.5-3.0 | 3.0-6.0 | 6.0-12.0 | 1.5-3.0 | 1.5-3.0 |
| conc.(milliers inclusions/kg) | 100 | 100 | 100 | 100 | 175 |

Le plan expérimental est donc constitué de 40 expériences à réaliser au total puisque chaque série est effectuée pour 4 hauteurs de lit différentes. Afin d'étudier légèrement plus en détails l'influence de la concentration d'entrée du système, un test a été exécuté à une concentration d'entrée du système 7 fois plus élevée qu'aux conditions standards. Cet essai n'a été réalisé que pour une hauteur de lit de 4 pouces en écoulement continu. À noter que les procédures de préparation et d'opération du modèle se retrouve aux annexes 2, 3 et 4.

2.4 Description de la méthode d'analyse

2.4.1 Quant à la répétitivité

La répétitivité a été éprouvée en comparant chacun des tests de mêmes paramètres selon qu'ils ont été effectués en écoulement continu ou en écoulement interrompu. Par exemple, le test d'une hauteur de 1 po de lit d'alumine 1.5-3 mm laissant passer un écoulement d'une teneur de 100 000 inclusions par kg d'eau à l'entrée du modèle et d'une vitesse de 1.8 mm/s pour une période continue a été comparé au test de mêmes paramètres

pour une période interrompue. Puisque les tests en écoulement continu et en écoulement interrompu n'ont pas la même durée totale, que les tests en écoulement interrompu sont perturbés par l'arrêt de circulation du fluide à travers le filtre à la 12000^{ième} seconde et que le modèle ne se stabilise qu'à la 6000^{ième} seconde environ pour fournir une valeur de concentration d'entrée constante, le critère de répétitivité n'est appliqué que pour la plage de données se situant entre 6000 et 12000 secondes. Ce critère se définit donc par la capacité des essais à obtenir la même efficacité de rétention, connaissant les concentrations moyennes à l'entrée et à la sortie pour la plage de temps présentée et justifiée précédemment. De plus, pour vérifier la validité des résultats expérimentaux, il est nécessaire d'effectuer le calcul du coefficient du filtre grâce aux données de concentration d'entrée et de sortie de ce dernier. Le calcul du coefficient est effectué entre la 1500^{ième} seconde et la 6000^{ième} seconde. Comme ce calcul nécessite l'hypothèse que la relâche n'intervient pas dans le processus de filtration, la valeur du coefficient a été déterminée dès le début des essais, au moment où la présence du phénomène de relâche est la moins probable. Ainsi, par ce calcul, il est possible de vérifier si le filtre correspond au coefficient théorique. Ce calcul permet de vérifier si le filtre étudié performe adéquatement selon sa hauteur. Lorsque le filtre en essai présente un coefficient semblable au coefficient théorique, le test est alors accepté et retenu comme étant valide.

2.4.2 Quant au comportement de la déposition totale

En introduisant certaines notions de calcul, il sera possible par la suite de présenter la façon dont les résultats expérimentaux de concentration d'entrée et de sortie du filtre seront utilisés afin de déterminer le comportement de la déposition des inclusions de PVC à l'intérieur du filtre étudié. Ainsi, la valeur de la déposition momentanée pour une section de filtre étudiée se calcule de la façon suivante :

$$\sigma_i = (C_{\text{entrée}} - C_{\text{sortie}}) \rho_l v \quad (2.1)$$

Où σ_i est la déposition pour l'instant étudié (inc/s), $C_{\text{entrée}}$ et C_{sortie} sont les concentrations calculées par les sondes LiMCA à l'entrée et à la sortie du filtre (inc/kg eau), ρ_l est la densité de l'eau à la température ambiante (kg/m^3) et v est le débit volumique de fluide qui passe à travers le filtre (m^3/s).

L'évolution du comportement de la déposition totale dans le filtre sera déterminée en intégrant l'aire sous la courbe obtenue de la déposition momentanée par la méthode d'intégration numérique des trapèzes. La méthode d'intégration composée se résume de cette façon :

$$\text{Déposition totale} = 0.5h[f(x_0) + f(x_1)] + 0.5h[f(x_1) + f(x_2)] + \dots \quad (2.2)$$

Où h est le pas de temps et $f(x_i)$ est la valeur de la déposition momentanée (σ_i). h se définit ainsi :

$$h = t_i - t_{i-1} \quad (2.3)$$

En intégrant la courbe de déposition momentanée (σ_i), il est possible d'obtenir le nombre total d'inclusions déposées. Afin de connaître combien il y a d'inclusions par unité de volume du lit filtrant, il est préférable de diviser par le volume réel de la section de lit étudiée. Ainsi, on obtient le nombre d'inclusions déposées pour chaque hauteur de lit filtrant (σ). De cette façon, la comparaison entre les différents paramètres à l'étude pour chaque section du lit filtrant est alors possible en écoulement continu comme en écoulement interrompu.

2.4.3 Quant au phénomène de relâche existant

Bien évidemment, l'objectif ultime de cette recherche est de dégager les expressions cinétiques du phénomène de relâche des inclusions par le filtre en écoulement continu et en écoulement interrompu tout comme d'améliorer la compréhension de ce même phénomène. Ces expressions mathématiques auraient pu être calculées à l'aide des courbes de déposition totale obtenues à l'aide des courbes de concentration d'entrée et de sortie du filtre telles que présentées au point précédent. L'expression mathématique de la relâche aurait été déterminée en effectuant la différence entre la valeur du taux d'accumulation initial ($\lambda u_s c$) calculé à l'aide des équations 1.11 et 1.12 provenant du modèle de Tien, la

vitesse superficielle et la concentration moyenne et la valeur de la pente de la tangente à chaque valeur de déposition pour un temps donné. Cependant, comme il a été vu dans la littérature [11], le terme d'accumulation est valide seulement au début du processus de filtration puisque, à ce moment, l'existence du phénomène de relâche est peu probable. De plus, la distribution de concentration dans le liquide à travers les interstices du filtre est difficile à connaître précisément. Ainsi, puisqu'il n'y a, dans la littérature, aucun modèle d'accumulation et de relâche valide pour les présentes conditions étudiées, l'étude propose un modèle d'accumulation et de relâche dont les résultats de simulation sont comparés aux résultats expérimentaux.

En effet ce modèle servira à dégager, à partir de certaines observations en laboratoire, les expressions mathématiques de l'accumulation et de la relâche en écoulement continu et interrompu par simulations. La valeur expérimentale de la concentration d'entrée sera introduite à l'algorithme. Ainsi, le modèle tente de reproduire la courbe de la concentration à la sortie du filtre. En effet, si les courbes de concentration de sortie calculées s'avèrent reproduire les courbes de concentration de sortie obtenues expérimentalement, le modèle de déposition des inclusions de PVC dans le filtre d'alumine tabulaire est alors valide. Il est alors possible d'en dégager les termes cinétiques associés à l'accumulation et à la relâche en écoulement continu et en écoulement interrompu.

Ce modèle ainsi que les résultats obtenus des simulations feront les objets du chapitre 4, en entier.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1 Introduction

Le présent chapitre présentera les résultats expérimentaux obtenus aux conditions standards tout comme aux changements de tailles des grains filtrants, de vitesse d'écoulement et de concentration d'inclusions soumis au système.

3.2 Données de concentration

Les courbes de concentration représentent l'évolution de la concentration en inclusions de PVC dans l'eau en fonction du temps. Grâce aux sondes LiMCA, il est possible d'obtenir à deux endroits différents ces données de concentration. Ainsi, l'évolution est connue à l'entrée et à la sortie du filtre. La différence entre l'entrée et la sortie permettra de déterminer le nombre d'inclusions de PVC, imitant les inclusions dans le métal, qui auront été déposées sur le médium filtrant choisi. Les données sont prises, en alternance, entre l'entrée et la sortie du filtre, à chaque minute. Les données de concentration sont divisées par plage de granulométrie. Ainsi, il est possible de connaître la concentration de toutes les tailles d'inclusions présentes dans l'eau au moment de la prise de données. Il est possible de connaître également la concentration totale des particules dans l'eau puisque le logiciel fabriqué par Bomem Inc. regroupe toutes les plages de granulométrie. À titre d'exemple, si la concentration visée d'entrée est de 100 000

inclusions par kilogramme d'eau, on vise ici la concentration totale incluant toutes les tailles d'inclusions de PVC. Clairement, puisque l'étude se concentre uniquement sur la plage 20-25 μm , dû au niveau de bruit trop élevé empêchant de considérer les plages de granulométrie supérieures, il est donc certain que le total d'inclusions de PVC par kilogramme d'eau dans cette plage sera moindre que 100 000 inclusions par kilogramme d'eau. Voici donc en figure 3.1, un exemple d'un ensemble de données recueillies pour l'essai d'un filtre de 1 po, à une vitesse de 1.8 mm/s et pour une concentration totale à l'entrée de 100 000 inclusions par kilogrammes d'eau.

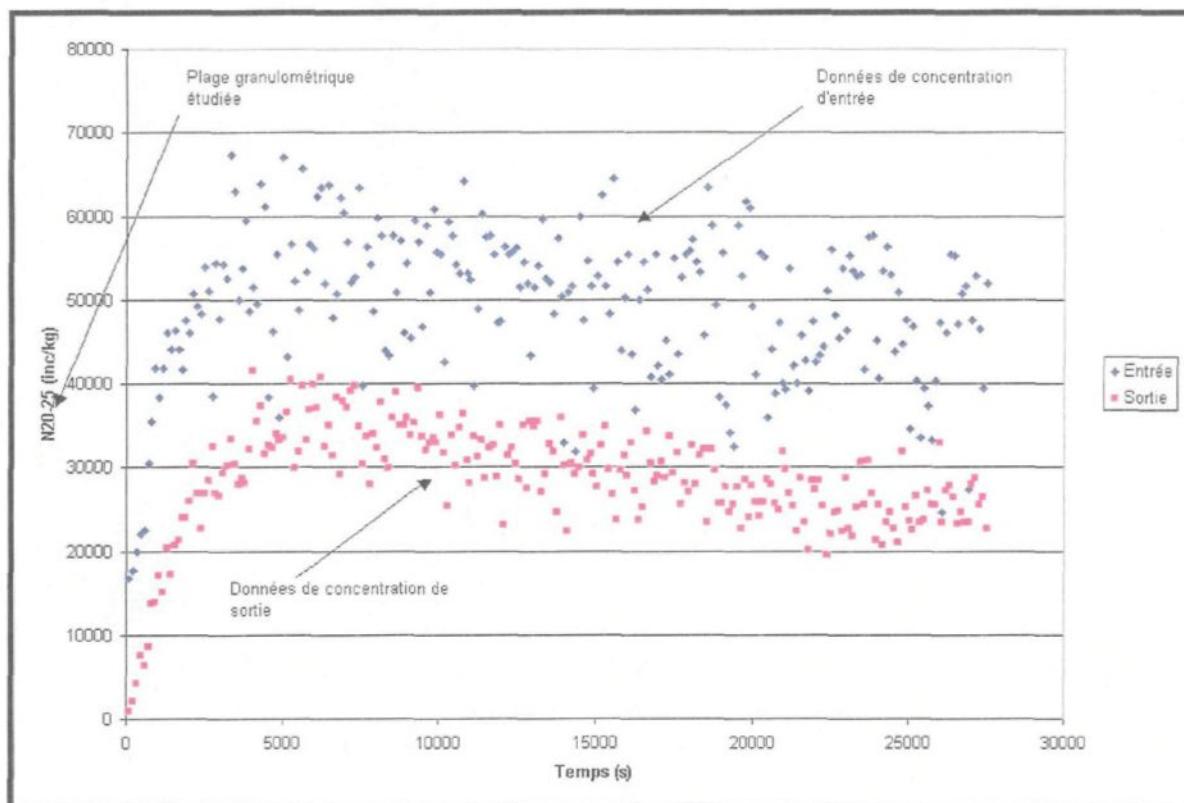


Figure 3.1: Exemple de données recueillies

Comme il a été présenté précédemment, le nombre d'inclusions par kilogramme d'eau recueillies pour la plage de 20-25 μm est moindre que 100 000 mais ce phénomène est normal puisque la concentration d'entrée visée de 100 000 inclusions par kilogramme d'eau englobe toutes les tailles d'inclusions (de 20 à 300 μm). À partir de ces données, il est possible de reconnaître la concentration d'entrée et la concentration de sortie du filtre, les deux ensembles de points se distinguant par la rétention d'un certain nombre d'inclusions ayant pénétré dans le filtre.

Grâce à ces données, il est possible, à l'aide du logiciel Table curve 2DTM, de lisser une courbe à travers ces points. Ce logiciel permet de trouver la meilleure fonction qui soit pour lisser la courbe le plus exactement possible. Ainsi, le logiciel présente par ordre d'adhérence (R^2), les fonctions qui pourraient être choisies pour lisser ces données de concentration. Dans tous les cas, la fonction qui présentera le coefficient R^2 le plus élevé pour l'ensemble de points étudiés sera retenue. Cette étape est nécessaire afin de pouvoir continuer la démarche des calculs, permettant de façon ultime, de déterminer l'expression mathématique de la relâche. Cette étape permet également de minimiser les erreurs de calculs dues au bruit dans les données. Voici donc, à titre d'exemple, en figure 3.2 et 3.3, la présentation des courbes suggérées par Table curve 2DTM pour ce qui est des données recueillies en écoulement continu et interrompu.

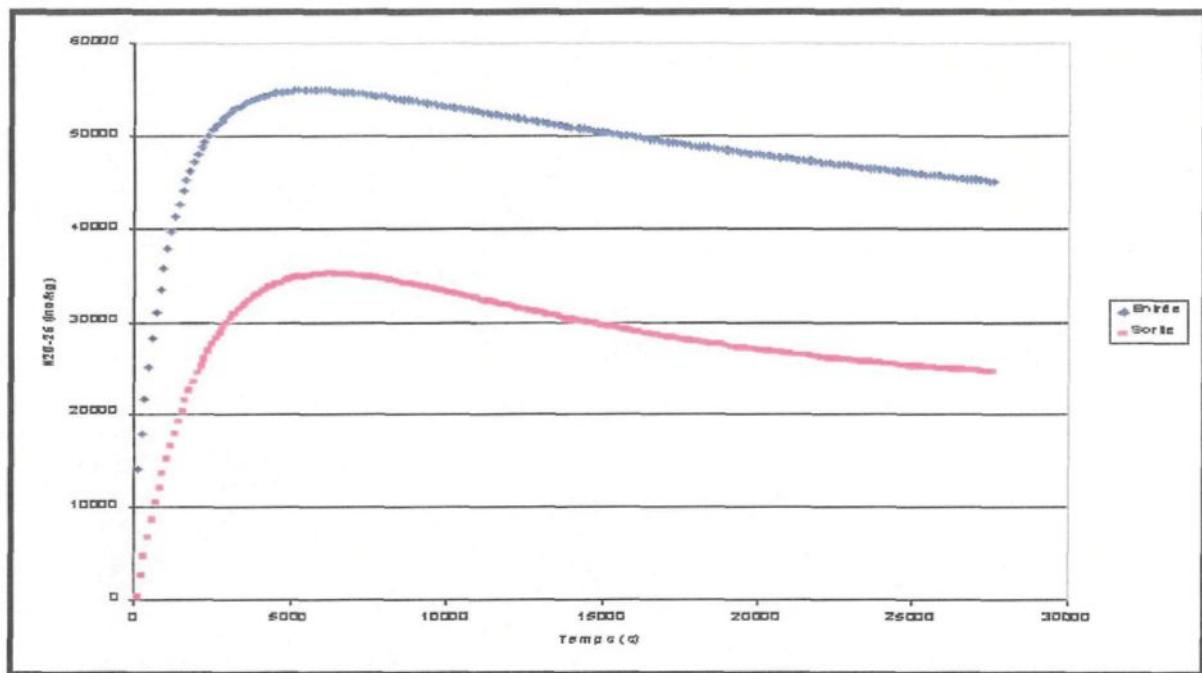


Figure 3.2 : Lissage des données expérimentales-écoulement continu

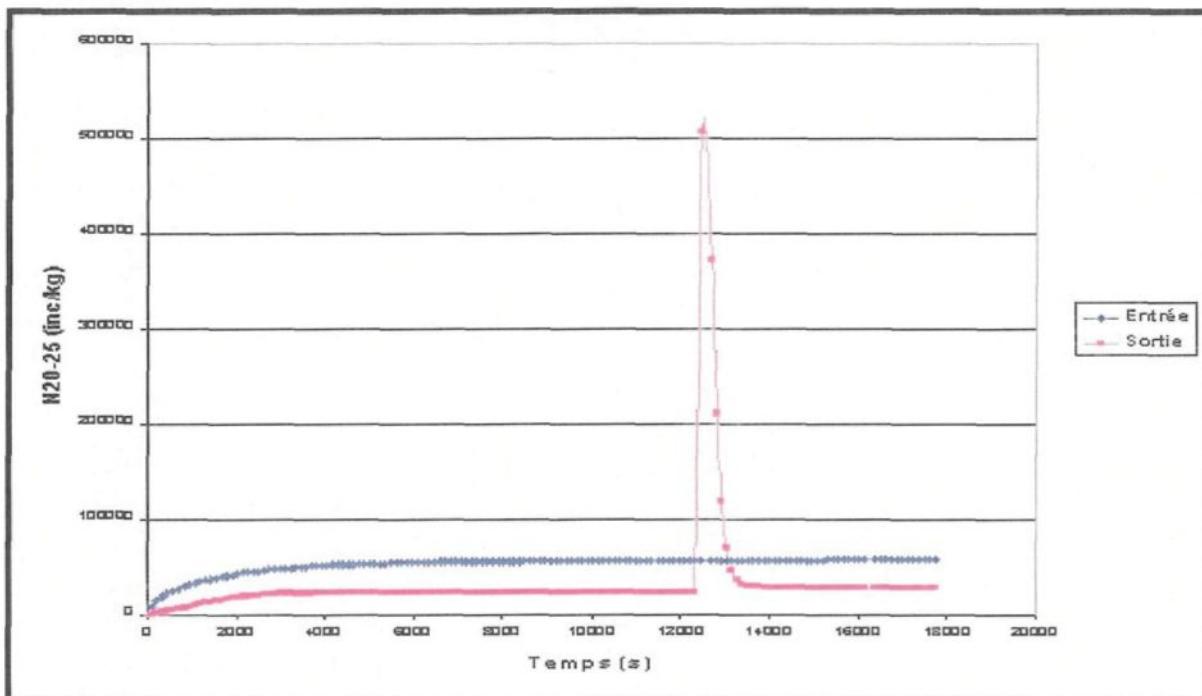


Figure 3.3 : Lissage des données expérimentales-écoulement interrompu

3.3 Validité des données de concentration

Puisque les essais sont effectués en écoulement continu et en écoulement interrompu, il est nécessaire de comparer les courbes de concentration obtenues à l'entrée et à la sortie du filtre pour chaque type d'écoulement. Les courbes en écoulement continu ont été évaluées jusqu'au dernier moment alors que les courbes de concentration obtenues en écoulement interrompu n'ont été considérées que jusqu'à 12 000 secondes (après 12 000 secondes, l'écoulement est interrompu). Ainsi, afin de vérifier si les tests étaient valides, la concentration moyenne à l'entrée et à la sortie ainsi que la comparaison entre le coefficient de filtration théorique ($\lambda_{\text{théo}}$) et expérimental (λ_{exp}) ont été effectuées. Voici sous forme de tableaux comparatifs les deux types d'écoulement étudiés selon les paramètres testés en laboratoire. Les tableaux 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6 présentent et comparent ces paramètres.

Tableau 3.1 : Comparaison des conditions expérimentales - séries 1 et 2 (cond. stand.)

| Paramètre : Alumine 1.5-3 mm, vitesse 1.8 mm/s, entrée 100 000 inc./kg eau | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|
| Écoulement continu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 100 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 24.2 m ⁻¹) |
| 1 | 91.49 | -8.51% | 53.04 | 21.13 | -12.69% |
| 2 | 98.90 | -1.10% | 14.55 | 30.20 | 24.79% |
| 3 | 96.04 | -3.96% | 11.35 | 23.03 | -4.83% |
| 4 | 98.01 | -1.99% | 3.41 | 27.61 | 14.09% |
| Écoulement interrompu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 100 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 24.2 m ⁻¹) |
| 1 | 97.14 | -2.86% | 35.15 | 33.21 | 37.23% |
| 2 | 96.29 | -3.71% | 14.18 | 31.93 | 31.94% |
| 3 | 96.98 | -3.02% | 9.96 | 25.85 | 6.82% |
| 4 | 91.57 | -8.43% | 8.37 | 20.37 | -15.83% |

Tableau 3.2 : Comparaison des conditions expérimentales - séries 3 et 4 (3-6 mm)

| Paramètre : Alumine 3-6 mm, vitesse 1.8 mm/s, entrée 100 000 inc./kg eau | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|
| Écoulement continu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 100 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 24.2 m ⁻¹) |
| 1 | 105.83 | 5.83% | 73.39 | 12.50 | -7.41% |
| 2 | 106.45 | 6.45% | 54.73 | 10.52 | -22.07% |
| 3 | 108.74 | 8.74% | 24.56 | 15.42 | 14.22% |
| 4 | 108.64 | 8.64% | 14.12 | 15.82 | 17.19% |
| Écoulement interrompu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 100 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 13.5 m ⁻¹) |
| 1 | 100.23 | 0.23% | 63.53 | 14.65 | 8.52% |
| 2 | 107.20 | 7.20% | 43.30 | 14.77 | 9.41% |
| 3 | 102.33 | 2.33% | 31.73 | 12.66 | -6.22% |
| 4 | 93.90 | -6.10% | 13.27 | 16.17 | 19.78% |

Tableau 3.3 : Comparaison des conditions expérimentales - séries 5 et 6 (6-12 mm)

| Paramètre : Alumine 6-12 mm, vitesse 1.8 mm/s, entrée 100 000 inc./kg eau | | | | | |
|---|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| Écoulement continu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 100 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 7.4 m ⁻¹) |
| 1 | 107.79 | 7.79% | 72.21 | 11.87 | 59.76% |
| 2 | 106.62 | 6.62% | 54.21 | 9.66 | 30.01% |
| 3 | 100.08 | 0.08% | 48.86 | 8.23 | 10.77% |
| 4 | 114.69 | 14.69% | 39.74 | 8.62 | 13.81% |

| Écoulement interrompu | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 100 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 7.4 m ⁻¹) |
| 1 | 78.00 | -22.00% | 52.14 | 12.58 | 69.31% |
| 2 | 105.80 | 5.80% | 51.85 | 11.88 | 59.89% |
| 3 | 106.87 | 6.87% | 49.89 | 7.61 | 2.42% |
| 4 | 99.04 | 0.96% | 37.88 | 7.79 | 3.85% |

Tableau 3.4 : Comparaison des conditions expérimentales - séries 7 et 8 (3.6 mm/s)

| Paramètre : Alumine 1.5-3 mm, vitesse 3.6 mm/s, entrée 100 000 inc./kg eau | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| Écoulement continu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 100 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 7.4 m ⁻¹) |
| 1 | 127.89 | 27.89% | 90.83 | 15.09 | 18.26% |
| 2 | 110.13 | 10.13% | 64.87 | 10.43 | -18.26% |
| 3 | 113.67 | 13.67% | 32.90 | 12.50 | -2.34% |
| 4 | 117.32 | 17.32% | 37.56 | 10.12 | -20.94% |

| Écoulement interrompu | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 100 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 12.8 m ⁻¹) |
| 1 | 109.91 | 9.91% | 67.87 | 16.00 | 25.00% |
| 2 | 118.62 | 18.62% | 38.73 | 20.62 | 61.09% |
| 3 | 116.11 | 16.11% | 35.43 | 14.63 | 14.30% |
| 4 | 102.39 | 2.39% | 28.50 | 13.06 | 2.03% |

Tableau 3.5 : Comparaison des conditions expérimentales- séries 9 et 10 (175 000 inc./kg eau)

| Paramètre : Alumine 1.5-3 mm, vitesse 1.8 mm/s, entrée 175 000 inc./kg eau | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|
| Écoulement continu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 175 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 24.2 m ⁻¹) |
| 1 | 197.48 | 12.85% | 65.13 | 35.97 | 48.64% |
| 2 | 183.09 | 4.62% | 18.86 | 33.64 | 39.00% |
| 3 | 202.53 | 15.73% | 16.1 | 25.65 | 5.99% |
| 4 | 169.66 | -3.05% | 13.5 | 19.9 | -17.77% |
| Écoulement interrompu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 175 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 24.2 m ⁻¹) |
| 1 | 170.96 | -2.31% | 84.69 | 23.88 | -1.32% |
| 2 | 172.49 | -1.43% | 20.02 | 35.96 | 48.60% |
| 3 | 165.89 | -5.21% | 15.83 | 25.69 | 1.49% |
| 4 | 161.36 | -7.79% | 5.89 | 27.19 | 12.36% |

Tableau 3.6 : Comparaison des conditions expérimentales - série 11 (700 000 inc./kg eau)

| Paramètre : Alumine 1.5-3 mm, vitesse 1.8 mm/s, entrée 700 000 inc./kg eau | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|
| Écoulement continu | | | | | |
| Hauteur (po) | Entrée moy. (millier inc./kg eau) | Déviation (cible 700 000 inc./kg eau) | Sortie moy. (millier inc./kg eau) | Lambda exp. (m ⁻¹) | Déviation lambda théo. (cible 24.2 m ⁻¹) |
| 4 | 687.96 | -1.72% | 77.03 | 17.35 | -28.31% |

À la lumière de ces résultats, il est possible de remarquer que les tests effectués ont tous été exécutés avec une concentration d'entrée d'inclusions de PVC atteignant la cible déterminée soit 100 000, 175 000 ou 700 000 inclusions par kg d'eau selon les essais. Le maximum d'écart obtenu étant de 27.89%. Il est donc possible d'affirmer que les filtres

granulaires essayés ont tous été soumis aux mêmes conditions en écoulement continu comme en écoulement interrompu.

Quant aux coefficients de filtration expérimentaux (λ_{exp}) obtenus par la formule 1.19 proposée au chapitre 1 pour les premiers instants de chaque essai, c'est à dire entre la 1500^{ième} et la 6000^{ième} seconde de filtration, moment où il est supposé que la relâche n'intervient pas dans le processus, il s'avère que la cible soit plus difficiles à obtenir pour les lits de un et deux pouces. À ces hauteurs de lit, les déviations sont assez élevées (les lits de 3 ou 4 pouces présentent des déviations ne dépassant pas 28%). Cette situation peut s'expliquer par certains facteurs d'erreur présentés ci-dessous :

1. Il est difficile, lors des essais en laboratoire, d'obtenir un lit identique à chaque nouvel essai effectué. Ainsi, à chaque fois qu'un essai est répété pour une même hauteur de lit, rien assure que la configuration du nouveau lit est une réplique exacte de l'ancien lit.
2. Par leur faible épaisseur, les lits de 1 ou 2 pouces seront plus vulnérables aux chemins préférentiels que peut emprunter l'écoulement d'eau chargée d'inclusions de PVC que les lits de 3 ou 4 pouces. En effet, la résistance plus grande à l'écoulement pour les lits de 3 et 4 pouces permet de mieux uniformiser et mieux stabiliser le fluide à travers le filtre que les lits de 1 ou 2 pouces. Si par erreur les inclusions empruntent un chemin préférentiel qui débouche loin de la sonde prenant les échantillons, la lecture de concentration de sortie sera faussée puisque le patron de concentration de sortie n'est

pas uniforme. De la même façon, s'il s'avérait que le chemin préférentiel termine près de cette même sonde, les résultats en seraient tout autant affectés.

3. Le vieillissement des particules d'alumine peut être la cause des écarts plus prononcés. En effet, même si les grains filtrants ont été lavés à l'eau propre entre chaque essai, l'usure due au temps et à une utilisation répétée est inévitable. Aucun symptôme permettant de déceler le moment opportun de renouveler les grains filtrants n'a pu être diagnostiqué tant au niveau de l'apparence des grains qu'au niveau de l'efficacité de filtration obtenue avec ceux-ci.
4. À noter également que le coefficient est calculé avec les courbes de lissage. Si l'essai étudié présente beaucoup d'instabilité dans la concentration d'entrée comme dans la concentration de sortie, les courbes de lissage seront plus approximatives. Il se peut alors qu'elles induisent une certaine erreur dans le calcul.
5. Le calcul du coefficient de filtration théorique ($\lambda_{\text{théo}}$) ne tient compte que des phénomènes de sédimentation et d'interception. Avec le modèle expérimental réel, il est impossible de filtrer seulement à l'aide de ces deux mécanismes. Ainsi, il est possible que le modèle réel utilise d'autres mécanismes tels le mécanisme d'impact par inertie même si le mécanisme de sédimentation demeure le mécanisme principal [15] du processus.
6. Les grains filtrants utilisés dans les séries 3 et 4 (6-12 mm) ne possèdent pas une taille uniforme. Plusieurs grains filtrants dépassent les spécifications de granulométrie. (L'analyse de la taille des grains filtrants a été effectué grâce au logiciel CLEMEX voir

l'annexe 5, figure A5.3). Il est plausible qu'à des lits plus courts, le manque d'uniformité des grains filtrants ait un plus grand impact sur le processus de filtration.

Les plus gros écarts obtenus sont donc probablement le fruit d'une combinaison de ces facteurs d'erreur. Le fait que l'erreur obtenue pour les lits de 3 et 4 pouces soit toujours de 28% ou moins laisse présager que l'hypothèse de la formation de chemins préférentiels pour les lits filtrants plus minces de 1 ou 2 pouces soit valable. La formation de chemins préférentiels peut donc être considérée comme la principale source d'erreur affectant les valeurs du coefficient du filtre expérimental (λ_{exp}) pour les lits filtrants de 1 et 2 pouces.

Aussi, afin de confirmer la validité des données recueillies, l'exercice suivant a été complété :

En se référant à l'équation 1.19, l'évolution du changement du rapport de la concentration moyenne de sortie sur la concentration moyenne d'entrée en fonction de la hauteur du filtre a été tracée. En effet, sachant que l'équation 1.19 permet de trouver le coefficient du filtre théorique au début du processus de filtration, lorsqu'il est supposé que la relâche est inexistante, il est possible même si la démarche demeure plutôt une démarche approximative, d'évaluer si la pente de la courbe tracée s'approche de la valeur du coefficient de filtration théorique ($\lambda_{\text{théo}}$).

Donc en remaniant quelque peu l'équation 1.19, on arrive à cette dernière équation qui est en fait l'expression d'une pente.

$$-\left(\ln \left(\frac{C_{sortie}}{C_{entrée}} \right) \right) = \lambda L \quad (3.1)$$

Voici donc en figure 3.4 les pentes obtenues. À noter que les valeurs moyennes d'entrée et de sortie pour l'écoulement continu et interrompu ont été jumelées afin d'obtenir une meilleure approximation des pentes tracées.

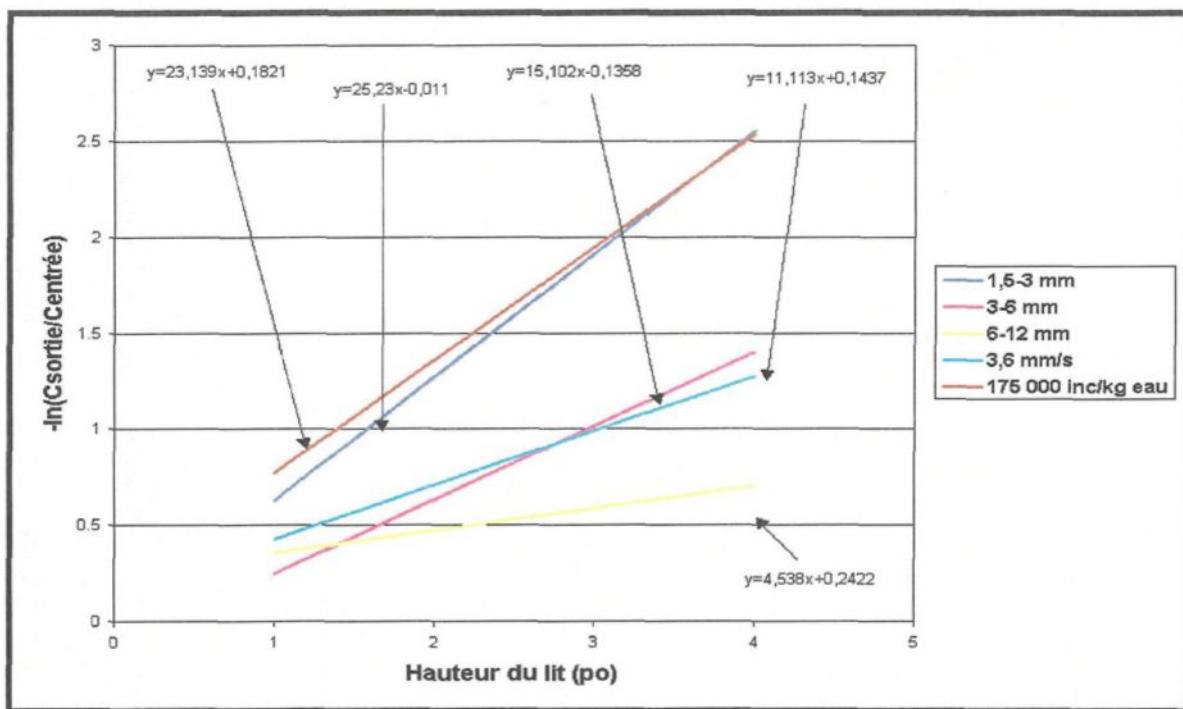


Figure 3.4 : Approximation des coefficients de filtration par la pente

Il est possible de remarquer que les pentes obtenues en traçant les courbes de tendances se rapprochent de la valeur théorique des coefficients de filtration déterminés à l'aide de la formule 1.8 présentée au chapitre 1. Voici le tableau 3.7 permettant de comparer la valeur de la pente obtenue et la valeur théorique du coefficient de filtration ($\lambda_{\text{théo}}$).

Tableau 3.7 : Comparaison λ expérimental vs λ théorique

| Paramètre étudié | Valeur de la pente | Coefficient Théo. | Écart |
|----------------------|--------------------|-------------------|---------|
| 1 (cond. stand.) | 25.23 | 24.20 | 4.26% |
| 3 (3-6 mm) | 15.10 | 13.50 | 11.85% |
| 5 (6-12 mm) | 4.54 | 7.43 | -38.90% |
| 7 (3.6 mm/s) | 11.11 | 12.80 | -13.20% |
| 9(175000 inc/kg eau) | 23.14 | 24.20 | -4.38% |

En évaluant les écarts, il est possible de conclure que les pentes coïncident de manière satisfaisante aux coefficients de filtration théoriques. Les résultats obtenus sont donc jugés satisfaisants et l'étude de la déposition et de la relâche des inclusions de PVC dans le filtre d'alumine peut être effectuée.

3.4 Analyse de l'efficacité du filtre granulaire

Une fois la validité des courbes vérifiée, il est possible à ce moment de commencer l'analyse des résultats proprement dite. À partir des courbes de concentration, il est possible de soutirer les courbes de l'évolution de l'efficacité du lit filtrant dans le temps. Ainsi, pour

chaque hauteur de lit, on peut s'attendre à une efficacité de filtration différente, la plus faible efficacité résultant du lit le moins épais. Pour chaque série effectuée en écoulement continu et en écoulement interrompu, l'efficacité de filtration a été tracée sur un même graphique pour chaque hauteur de lit afin de pouvoir les comparer et en discuter. L'efficacité de filtration s'exprimant ainsi :

$$\frac{C_{\text{entrée}} - C_{\text{sortie}}}{C_{\text{entrée}}} \quad (3.2)$$

Avant de présenter ces courbes, il est nécessaire de décrire les conditions d'opération des séries analysées. Le tableau 3.8 présente les séries d'expériences effectuées. Rappelons que l'étude des résultats ne s'effectuera que sur la plage de 20-25 μm vu le bruit élevé du signal ne permettant pas l'étude de la déposition et de la relâche pour une granulométrie d'inclusions plus grande.

Tableau 3.8 : Description des séries de tests effectuées

| Identification de la série | Description des paramètres |
|----------------------------|---|
| 1 | Alumine : 1.5-3 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 100 000 inc./kg eau Écoulement : continu |
| 2 | Alumine : 1.5-3 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 100 000 inc./kg eau Écoulement : interrompu |
| 3 | Alumine : 3-6 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 100 000 inc./kg eau Écoulement : continu |
| 4 | Alumine : 3-6 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 100 000 inc./kg eau Écoulement : interrompu |
| 5 | Alumine : 6-12 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 100 000 inc./kg eau Écoulement : continu |
| 6 | Alumine : 6-12 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 100 000 inc./kg eau Écoulement : interrompu |
| 7 | Alumine : 1.5-3 mm Vitesse : 3.6 mm/s Concentration entrée : 100 000 inc./kg eau Écoulement : continu |
| 8 | Alumine : 1.5-3 mm Vitesse : 3.6 mm/s Concentration entrée : 100 000 inc./kg eau Écoulement : interrompu |
| 9 | Alumine : 1.5-3 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 175 000 inc./kg eau Écoulement : continu |
| 10 | Alumine : 1.5-3 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 175 000 inc./kg eau Écoulement : interrompu |
| 11 | Alumine : 1.5-3 mm Vitesse : 1.8 mm/s Concentration entrée : 700 000 inc./kg eau Écoulement : continu |

4 pouces seulement

Les figures 3.5 à 3.15 présentent l'efficacité de chaque lit pour chaque série d'expériences effectuées. Les résultats seront discutés en détail dans les sections suivantes.

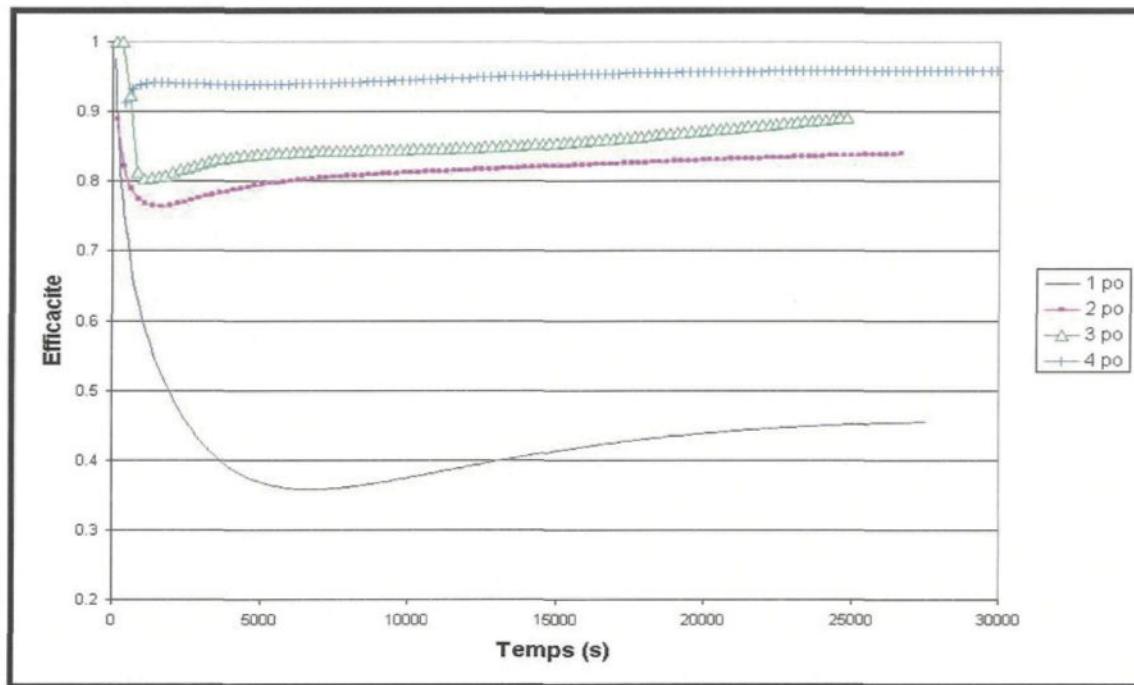


Figure 3.5 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 1 (cond. stand.)

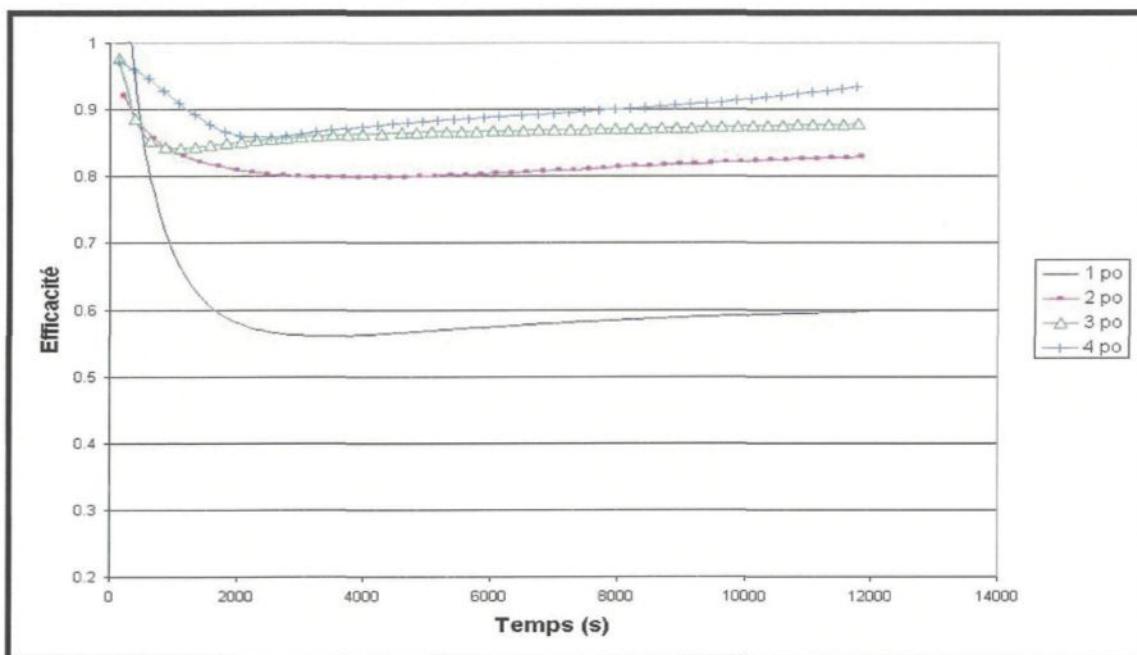


Figure 3.6 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 2 (cond. stand.)

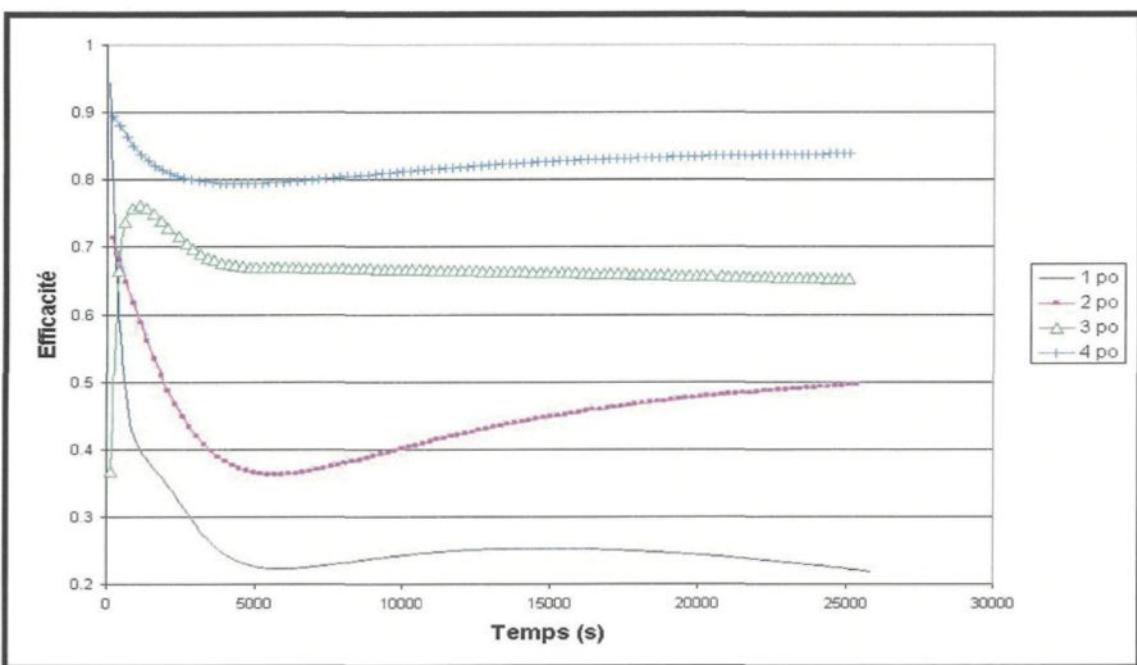


Figure 3.7 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 3 (3-6 mm)

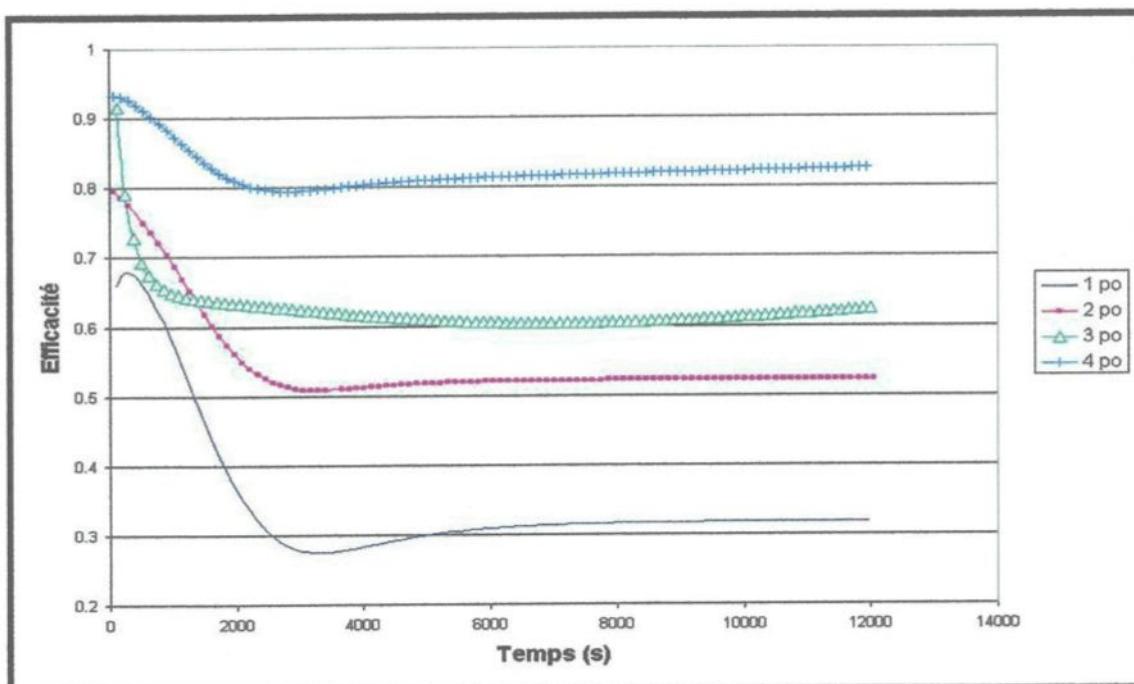


Figure 3.8 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 4 (3-6 mm)

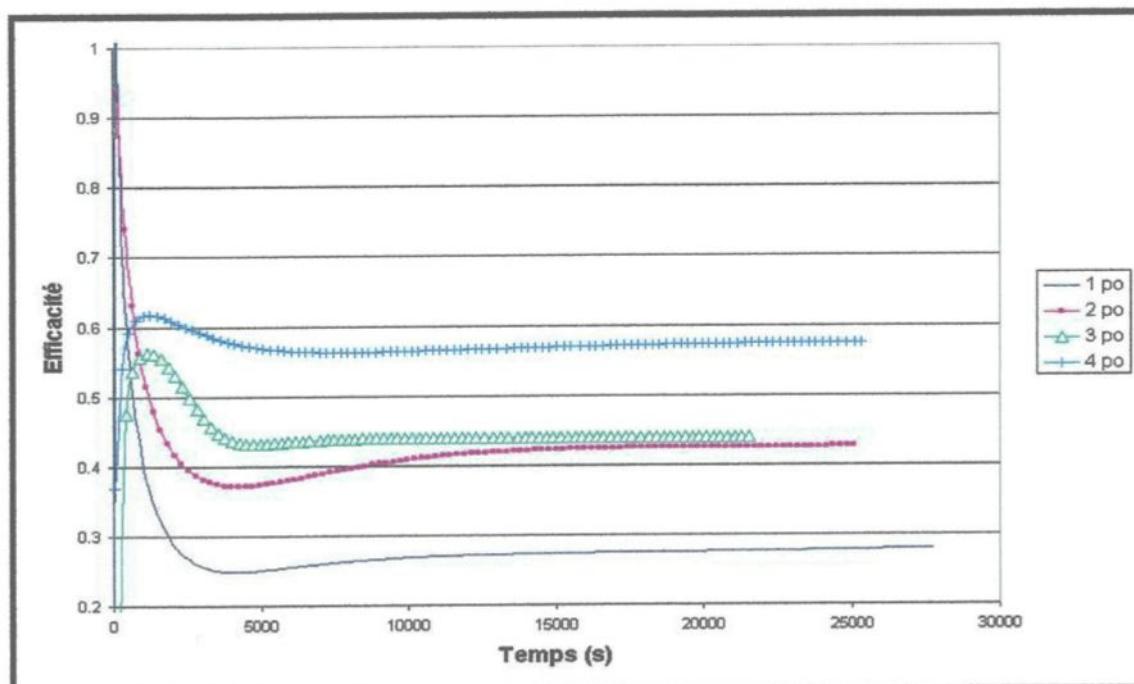


Figure 3.9 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 5 (6-12 mm)

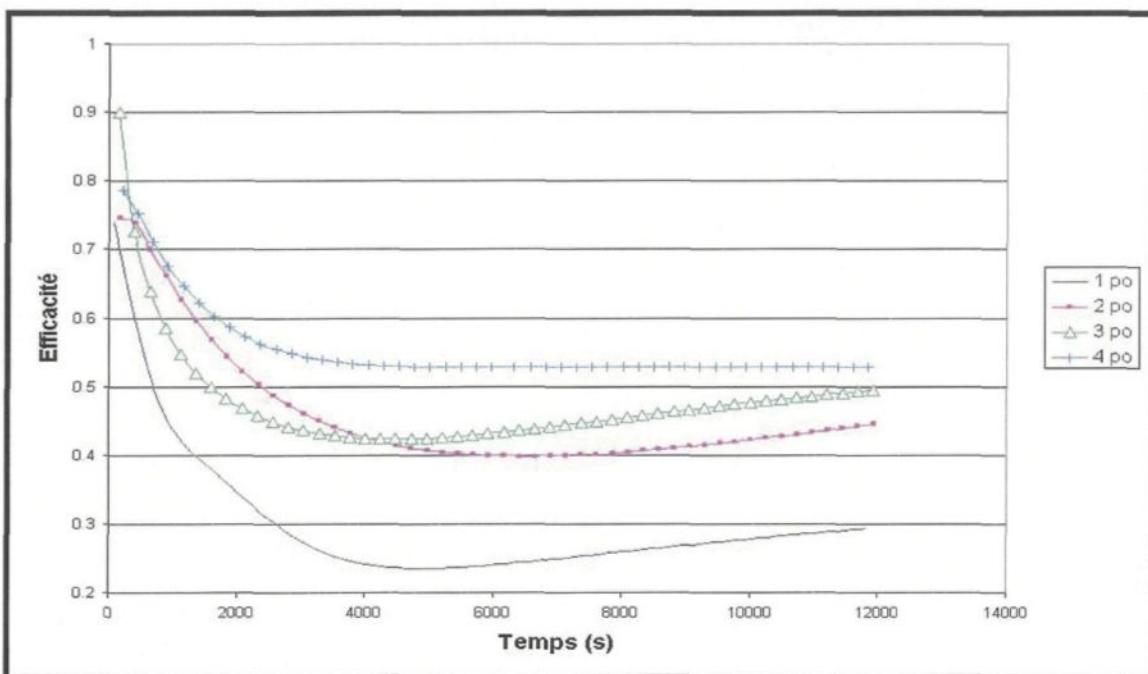


Figure 3.10 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 6 (6-12 mm)

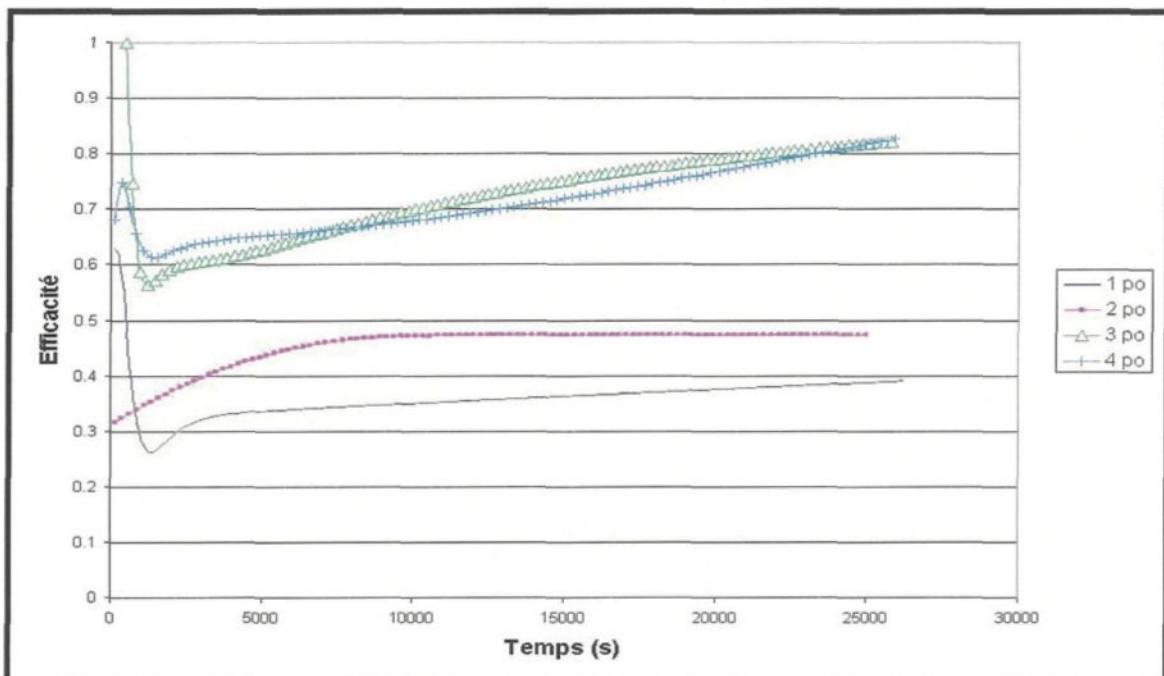


Figure 3.11 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 7 (3.6 mm/s)

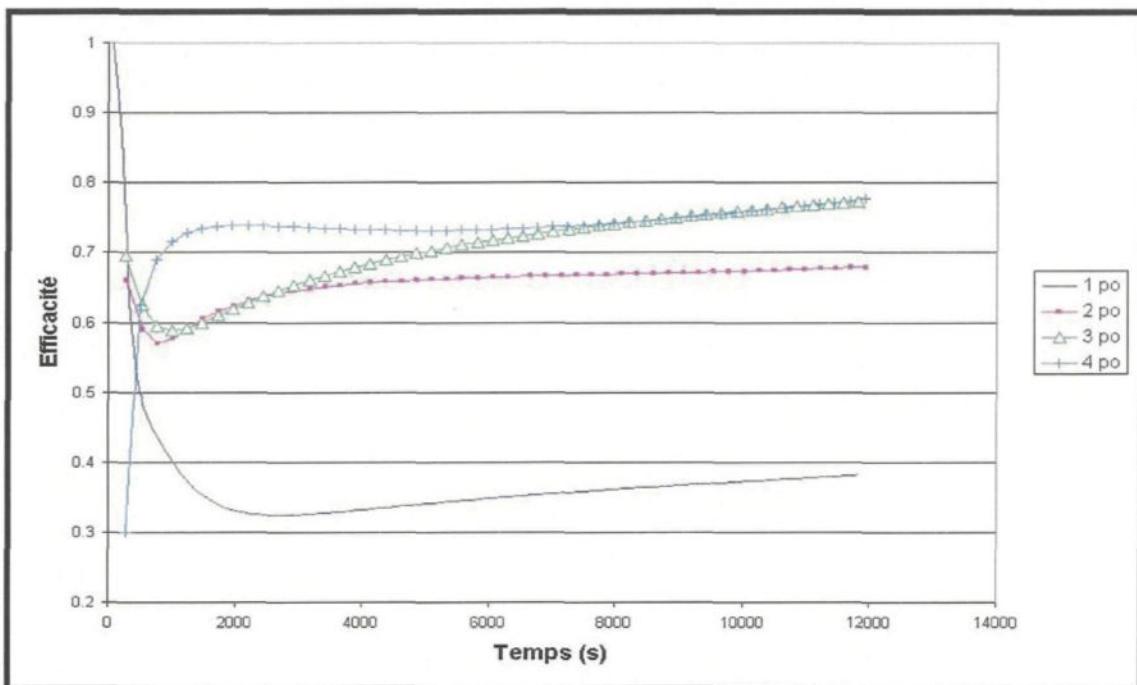


Figure 3.12 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 8 (3.6 mm/s)

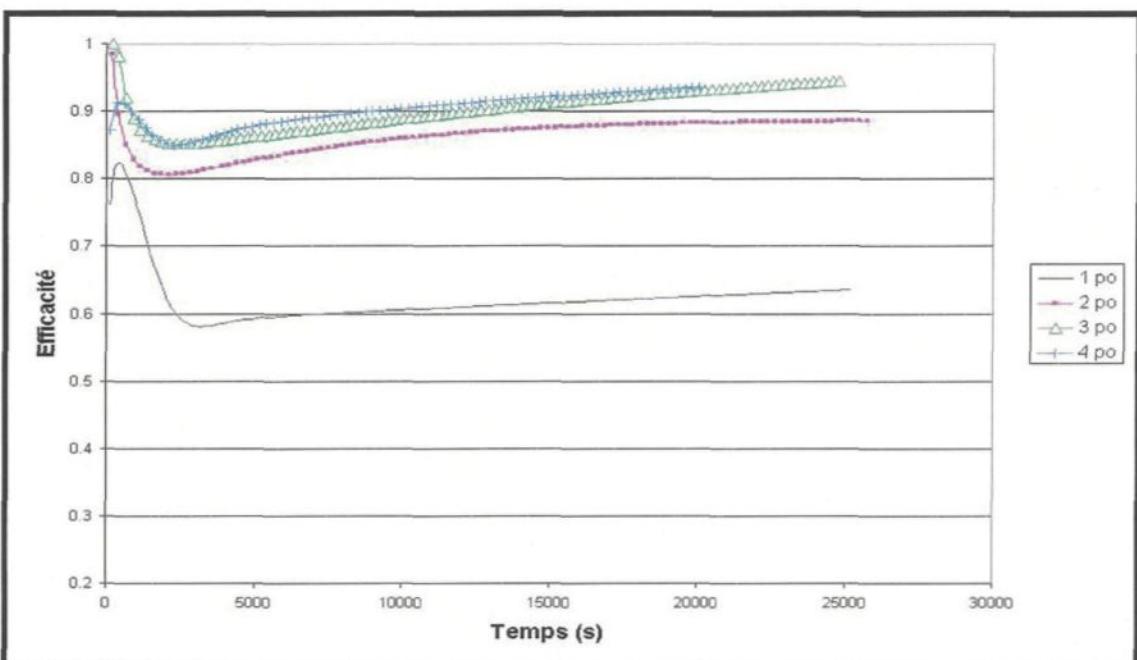


Figure 3.13 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 9 (175 000 inc/kg eau)

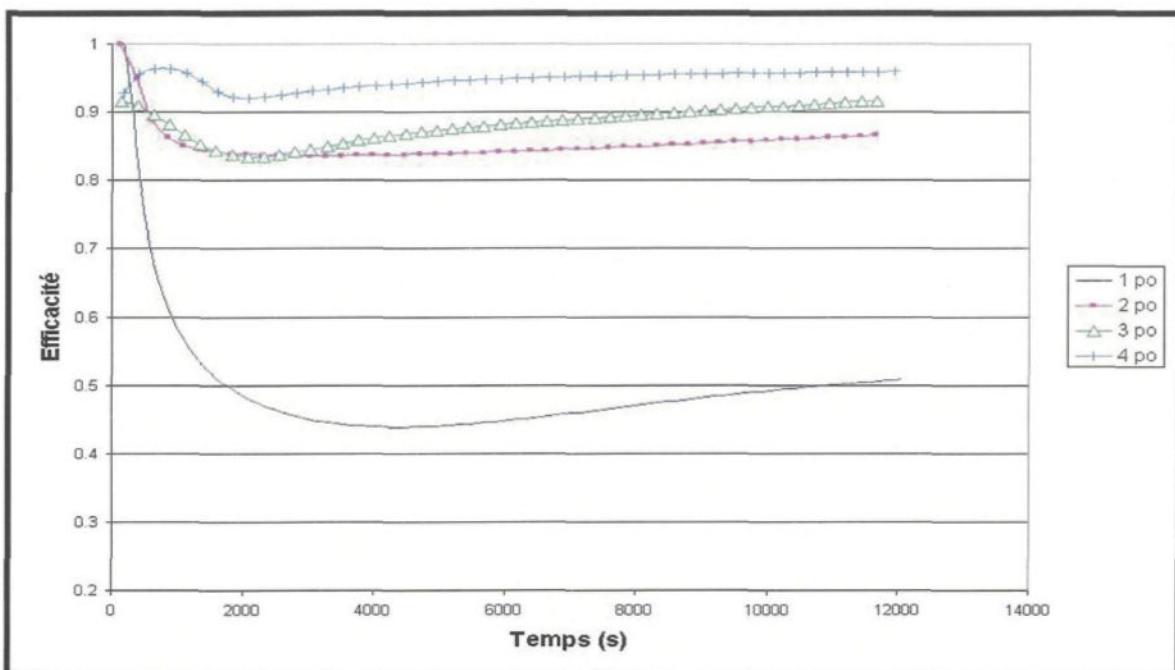


Figure 3.14 : Évolution de l'efficacité en écoulement interrompu série 10 (175 000 inc/kg eau)

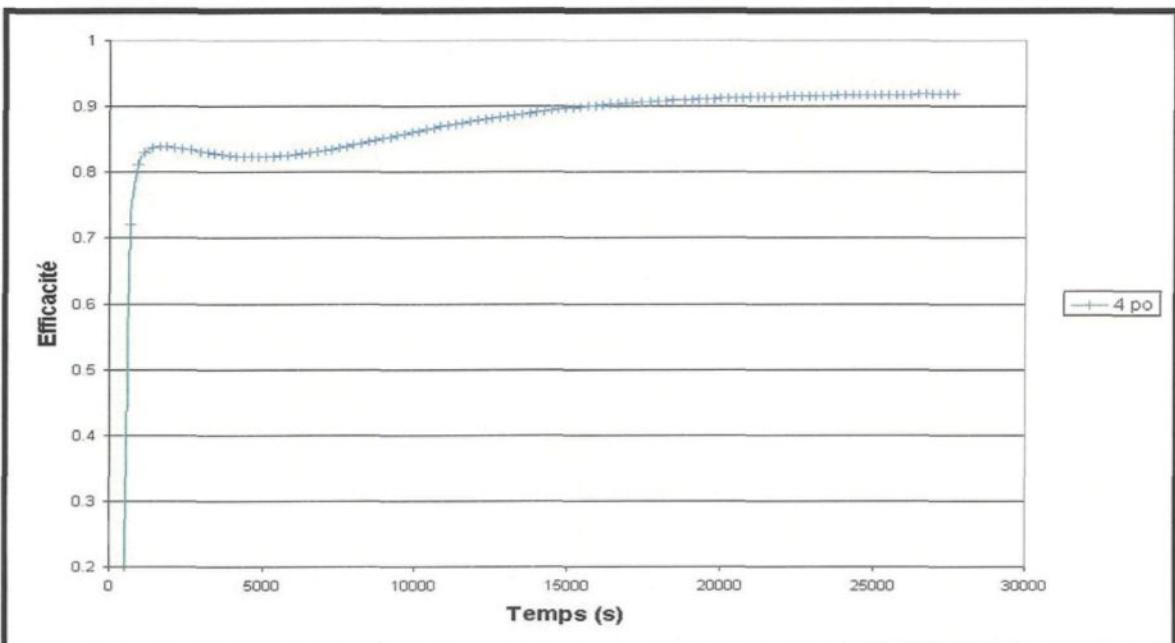


Figure 3.15 : Évolution de l'efficacité en écoulement continu série 11 (700 000 inc/kg eau)

3.4.1 En écoulement continu

À la suite d'observations, il est possible de remarquer que les tendances d'efficacité en fonction de la hauteur du lit sont les mêmes peu importe les paramètres d'opération utilisés. L'efficacité de filtration est en fait la capacité de rétention du filtre. Il est donc possible, pour chaque série effectuée en continu, de remarquer que plus la hauteur du lit augmente, plus l'efficacité est élevée. Ce comportement est tout à fait prévisible et répond aux attentes. Afin d'analyser en détail les résultats obtenus, il est important de mentionner que les valeurs obtenues avant la 1500^{ème} seconde seront rejetées puisqu'il est supposé que le modèle physique prend environ 25 minutes pour que la concentration d'entrée soit en régime établi (les efficacités de filtration de 100% obtenues aux premiers instants du processus ne sont pas valables, ils signifient tout simplement que les inclusions n'ont pas eu le temps de traverser le lit complètement avant la première lecture de la sonde LiMCA sous le filtre). Ainsi, en effectuant la comparaison entre les séries 1, 3 et 5 (voir figures 3.5, 3.7, 3.9) qui se différencient par la granulométrie du lit filtrant, il est possible de remarquer que plus la granulométrie est fine, plus l'efficacité est élevée et cela, pour chaque hauteur de lit filtrant. Donc, plus la granulométrie est grossière, plus le filtre a de la difficulté à retenir les inclusions de PVC. En se référant à l'équation 1.8, on constate que plus le diamètre du grain filtrant (d_g) est petit, plus la valeur de λ sera élevée et plus la déposition sera favorisée. Ainsi, pour un lit d'un pouce, il existe une diminution d'efficacité de filtration de 39% entre l'alumine 1.5-3 mm et 3-6 mm et une diminution de 33% entre l'alumine 1.5-3 mm et 6-12 mm. De façon logique, il aurait été justifié d'espérer une plus grande perte d'efficacité avec le lit d'alumine 6-12 mm. Cette légère augmentation de la part du lit fait

d'alumine 6-12 mm fait partie des risques d'erreur en expérimentation. Il est à noter d'ailleurs que le coefficient de filtration expérimental (λ_{exp}) pour le test effectué avec l'alumine 6-12 mm dépasse d'environ 30% le coefficient théorique alors que ce dernier est sous-estimé de près de 22% lors du test effectué avec l'alumine 3-6 mm. Aussi, le lit d'alumine dont les grains ont un diamètre entre 6 et 12 mm est le lit dont les grains sont les moins uniformes et dont certains grains dépassent largement 12 mm. La difficulté d'obtenir des résultats se rapprochant de la théorie est alors plus prédominante avec l'utilisation de ce lit. (Afin de prendre connaissance des caractéristiques de chaque groupe de lit d'alumine, il est possible de consulter l'annexe 5 à cet effet. La caractérisation de ces trois tailles de lit a été effectuée par analyse d'images grâce au logiciel CLEMEX.) De plus, comme il a été mentionné dans le paragraphe précédent, de façon générale, le lit d'une hauteur d'un pouce est plus fragile au niveau de la justesse des données. Quant aux trois autres configurations de lit filtrant, on note une diminution d'efficacité de 45% pour le lit de deux pouces, de 22% pour le lit de trois pouces et de 14% pour le lit de quatre pouces par la comparaison entre le lit d'alumine de taille 1.5-3 mm et le lit d'alumine de taille 3-6 mm. Finalement, il est possible de relever une diminution de l'efficacité de 49% pour le lit de deux pouces, de 48% pour le lit de trois pouces et de 46% pour le lit de quatre pouces si la comparaison entre le lit d'alumine 1.5-3 mm et 6-12 mm est effectuée. Il est possible de remarquer que la diminution d'efficacité reste constante avec l'utilisation de l'alumine 6-12 mm et qu'elle s'estompe en fonction de l'augmentation de la hauteur du lit lorsque l'alumine 3-6 est utilisée. Il est possible de conclure que la perte d'efficacité de filtration lorsque le lit d'alumine de taille 3-6 mm est utilisé est compensée lorsque la hauteur du lit augmente. À

titre de résumé, voici sous forme graphique (figure 3.16), l'évolution de l'efficacité de filtration pour un lit de 4 pouces en fonction du temps pour les différentes tailles de grains filtrants.

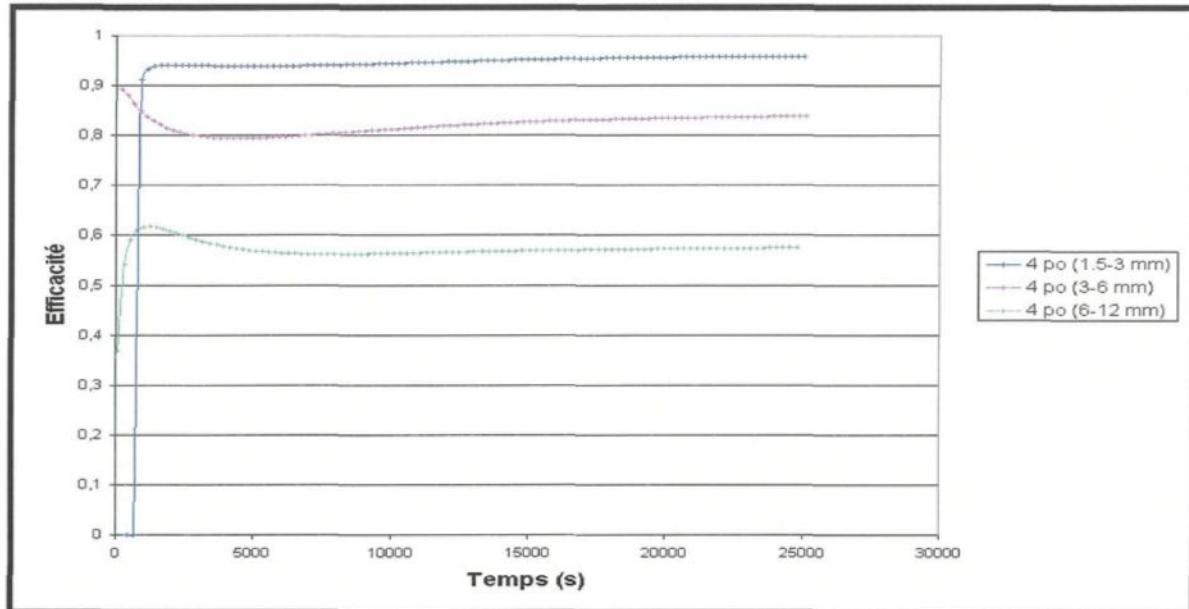


Figure 3.16 : Évolution de l'efficacité pour 1.5-3, 3-6 et 6-12 mm séries 1, 3 et 5 – 4 po

Quant à la série où la vitesse d'écoulement est doublée (série 7) (voir figure 3.11), il est possible de remarquer que l'augmentation de la vitesse cause une diminution de l'efficacité de filtration. En effet, on note une diminution de 16% pour ce qui est d'un lit d'un pouce, d'une diminution de 44% et de 16% pour les lits de 2 et 3 pouces respectivement et d'une diminution d'efficacité de 24% pour un lit de 4 pouces par comparaison avec la série de tests 1 (voir figure 3.5) effectuée aux conditions standards. Mise à part la diminution plus marquée pour le filtre d'une hauteur de 2 pouces, la diminution d'efficacité semble à peu près constante pour l'ensemble des tests. Cette diminution d'efficacité correspond bien à la littérature [8] qui prévoit justement une perte à ce niveau si la vitesse de l'écoulement est

augmentée. L'équation 1.8 démontre encore une fois que si la vitesse d'écoulement est augmentée, la déposition est diminuée. Aussi, en augmentant la vitesse d'écoulement, la vitesse interstitielle augmente également ce qui affecte le temps de contact entre les inclusions et le filtre. L'écart plus élevé pour un lit de deux pouces peut être attribué à l'instabilité du système. En effet, pour l'essai avec un lit de 2 pouces dans la série 1, le coefficient de filtration est 25% plus élevé que le coefficient théorique et pour la série 7, le coefficient de filtration expérimental obtenu est sous-estimé à environ 18%. Ceci explique que l'efficacité obtenue lors de cet essai est un peu faussée. Toujours à titre indicatif, voici à la figure 3.17, l'évolution de l'efficacité pour des lits de 4 pouces à différentes vitesses d'écoulement.

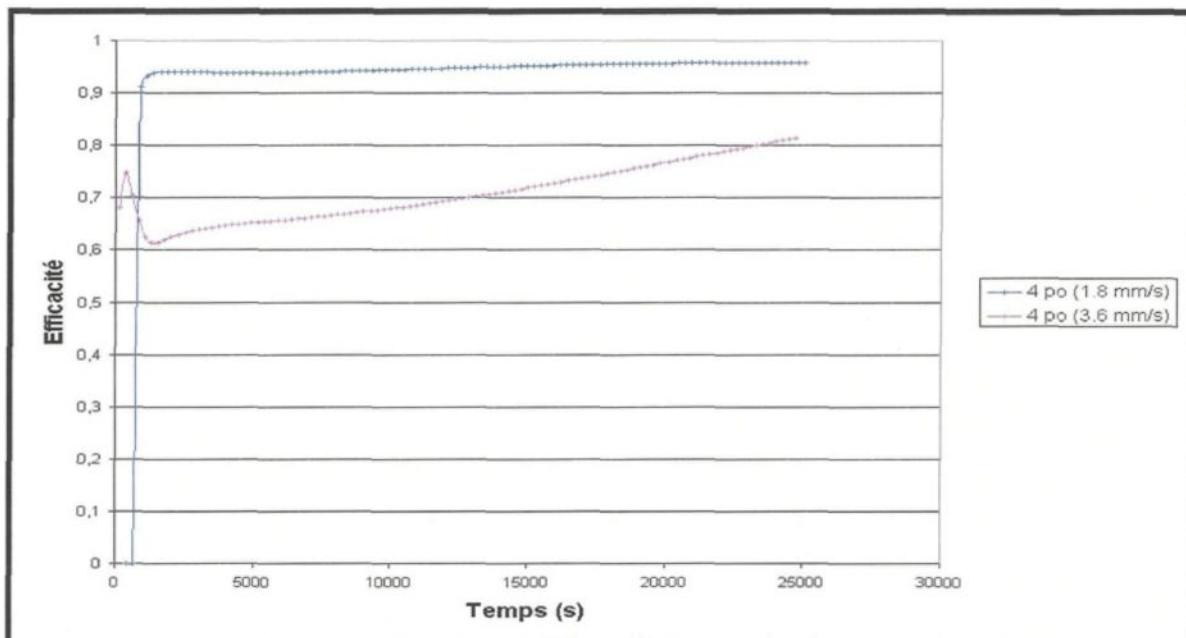


Figure 3.17 :Évolution de l'efficacité pour 1.8 et 3.6 mm/s séries 1 et 7 – 4 po

Finalement, en terme de comparaison, il est possible de remarquer les effets d'une concentration plus élevée à l'entrée du système (série 9) (voir figure 3.13). Effectivement, on note une augmentation de l'efficacité par rapport aux conditions standards de la série de tests 1 (voir figure 3.5) qui sont de 44% pour un lit d'un pouce, 5% pour un lit de deux pouces et de 5% pour un lit de trois pouces. On note une légère diminution de l'efficacité de 5% pour un lit de quatre pouces. Malgré la baisse d'efficacité obtenue pour le lit filtrant de quatre pouces, il est possible de conclure que de façon générale, l'utilisation d'une solution plus concentrée en inclusions de PVC permet d'augmenter l'efficacité de rétention du filtre utilisé pour les filtres les moins hauts. Ceci est prévisible puisque, selon l'équation 1.10, l'accumulation est directement proportionnelle à la concentration des inclusions ($\lambda u_s c$). L'accumulation plus prononcée modifie la structure du réseau poreux du filtre ce qui favorise l'accumulation subséquente. Notons que l'augmentation d'efficacité pour les lits de 2, 3 et 4 pouces, peut être qualifiée d'assez faible par rapport à la performance de filtration aux conditions standards. Afin d'observer une augmentation d'efficacité plus prononcée pour les lits plus hauts, la concentration d'entrée a été multipliée par un facteur de 7 (figure 3.15) pour une durée de 7 heures. L'augmentation de l'efficacité de filtration pour un lit de 4 pouces, due à l'augmentation de la concentration d'entrée n'a pu être décelée à travers cet essai. L'augmentation de concentration aurait pu diminuer la valeur de la porosité dans le temps. À l'aide de la formule 1.8, on remarque que la diminution de porosité entraîne alors une augmentation de la valeur « p » et il en résulte que le coefficient de filtration est augmenté et donc, l'efficacité de filtration n'est que meilleure. Dans le cas qui nous intéresse, l'effet de l'augmentation de la concentration d'entrée n'a peu ou pas eu

d'effet. Ceci confirme que l'effet du changement de paramètre opérationnel devient moins prononcé au fur et à mesure que la hauteur du lit augmente. Peu importe que l'effet soit positif ou négatif. Afin de vérifier l'influence de l'augmentation de la concentration pour des hauteurs de lit plus appréciables, les expérimentations auraient dû s'échelonner sur des périodes plus longues (24 ou 48 heures). Cependant, le montage tel qu'il est constitué présentement ne permet pas d'exécuter ce genre de test. Voici pour le lit de 4 pouces l'évolution de l'efficacité de filtration selon le changement de concentration des inclusions dans l'eau (figure 3.18). La légère baisse d'efficacité est attribuable aux erreurs expérimentales.

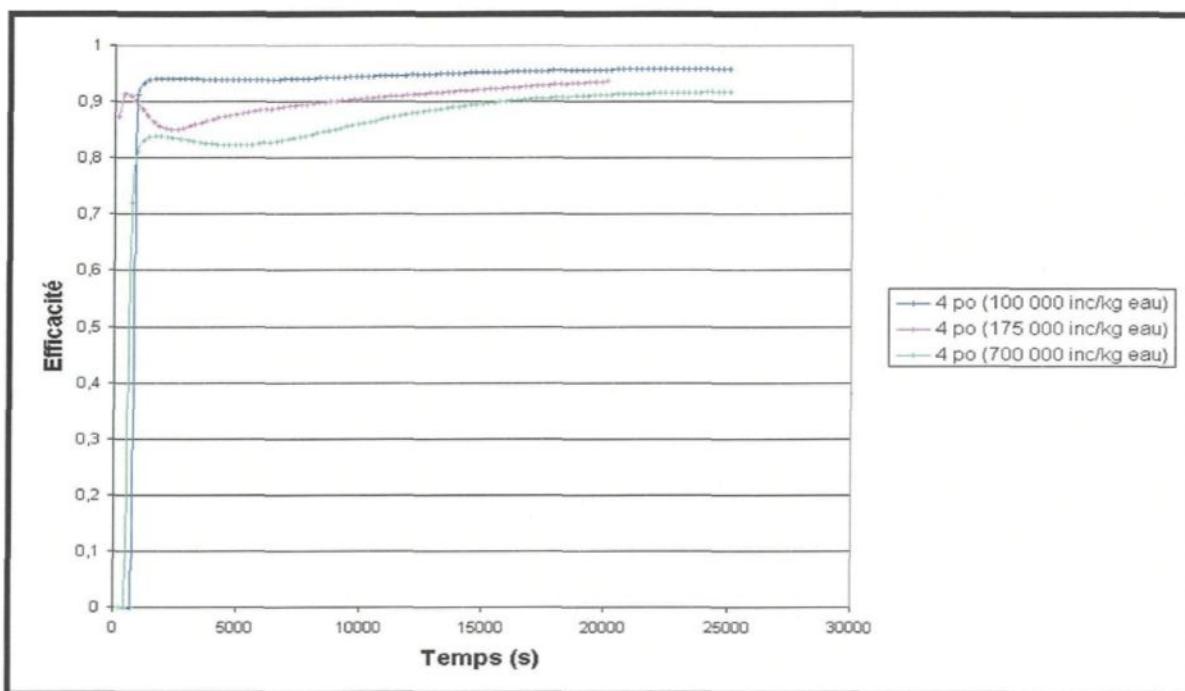


Figure 3.18 : Évolution de l'efficacité pour 100 000, 175 000 et 700 000 inc/kg eau séries 1, 9 et 11 – 4 po

Voici en résumé les pourcentages d'écart entre les différentes efficacités obtenues au tableau 3.9. À noter que les pourcentages d'écart sont toujours effectués en comparaison aux conditions standards de la série 1.

Tableau 3.9 : Résumé des écarts (en %) obtenus d'efficacité par rapport aux conditions standards - écoulement continu

| Série | 1 po | 2 po | 3 po | 4 po |
|------------------------|------|------|------|------|
| 3 (3-6 mm) | -39 | -45 | -22 | -14 |
| 5 (6-12 mm) | -33 | -49 | -48 | -46 |
| 7 (3.6 mm/s) | -16 | -44 | -16 | -24 |
| 9 (175000 inc/kg eau) | +44 | +5 | +5 | -5 |
| 11 (700000 inc/kg eau) | X | X | X | -9 |

Ainsi, le fait que l'efficacité augmente en fonction de l'augmentation de la hauteur du lit filtrant, le fait que l'efficacité de filtration augmente en fonction de l'augmentation de la concentration d'entrée (surtout pour le lit d'un pouce) et le fait que l'efficacité de filtration diminue lorsque la taille des grains filtrants augmente et lorsque la vitesse d'écoulement augmente démontrent que le comportement du système expérimental correspond à la théorie présentée au chapitre 1, et corroborent certaines observations faites en industrie et certains résultats de tests effectués en laboratoire [8,11].

3.4.2 En écoulement interrompu

Notons d'autre part que les tests effectués pour des écoulements interrompus démontrent que l'évolution de l'efficacité se comporte de la même façon que les tests continus jusqu'à ce qu'un arrêt soit provoqué. Ainsi, l'efficacité sera grandissante avec l'augmentation de l'épaisseur du lit. Aussi, en réaction à une interruption d'écoulement, l'efficacité passe d'un état positif à un état négatif. Une efficacité négative démontre que le système relâche des inclusions capturées auparavant. Ainsi, il est possible, grâce aux courbes d'efficacité, de conclure que plus le lit filtrant est mince, plus l'efficacité passe dans un état négatif, donc, plus la présence de relâche est évidente. Il est possible de croire que lorsque la hauteur du lit filtrant est augmentée, les inclusions relâchées par les couches supérieures sont capturées à nouveau par les couches inférieures du lit avant de sortir complètement de ce dernier et être ainsi comptabilisées par le tube LiMCA situé sous le filtre. Voici, pour chaque série effectuée en écoulement interrompu, l'évolution de l'efficacité de filtration pour toute la durée de l'essai, et, par le fait même, la preuve évidente de la présence de relâche créée par l'arrêt momentané de la circulation du fluide (figures 3.19 à 3.23).

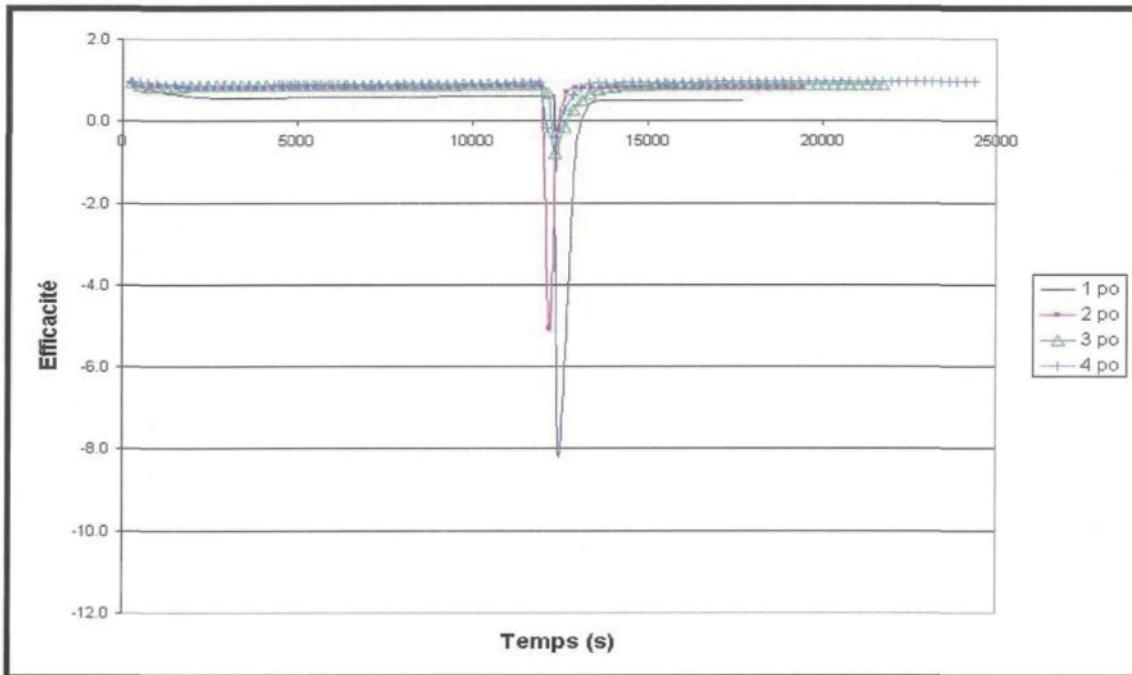


Figure 3.19 : Évolution de l'efficacité série 2 (cond. stand.)

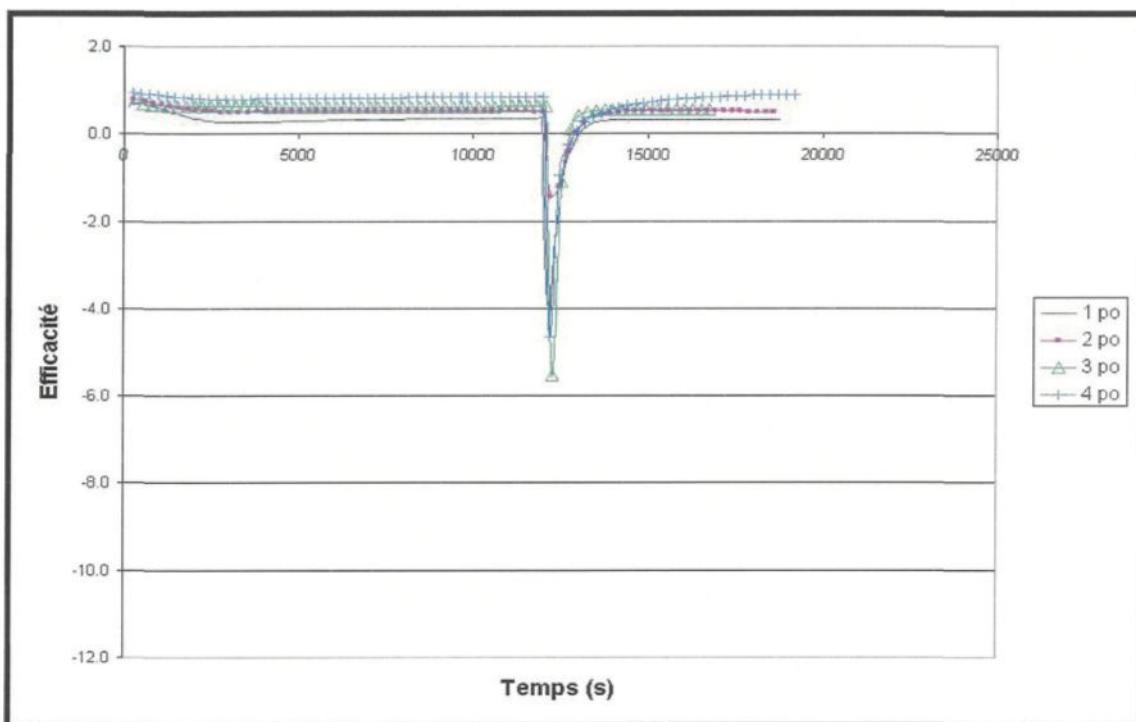


Figure 3.20 : Évolution de l'efficacité série 4 (3-6 mm)

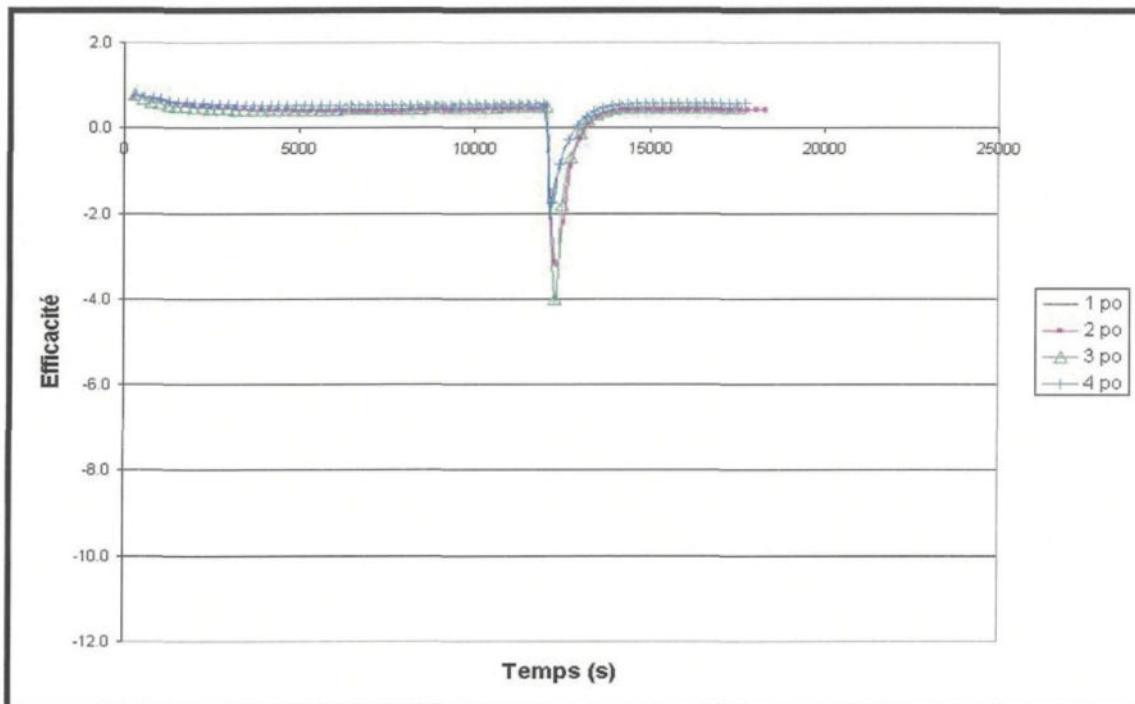


Figure 3.21 : Évolution de l'efficacité série 6 (6-12 mm)

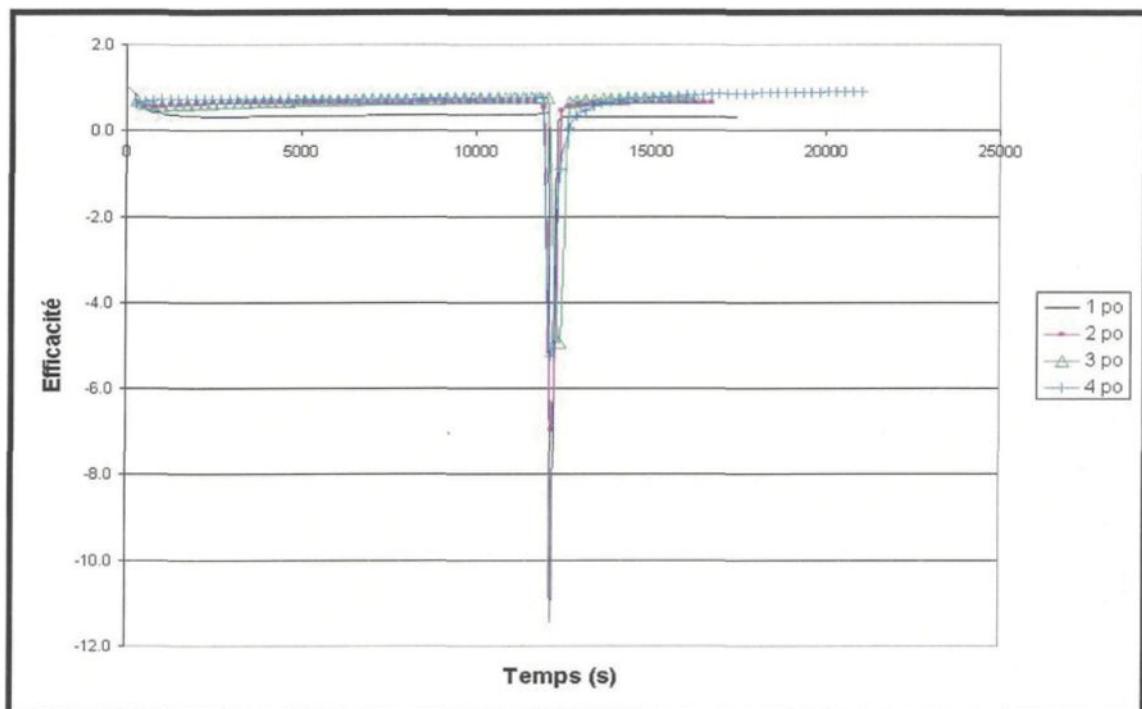


Figure 3.22 : Évolution de l'efficacité série 8 (3.6 mm/s)

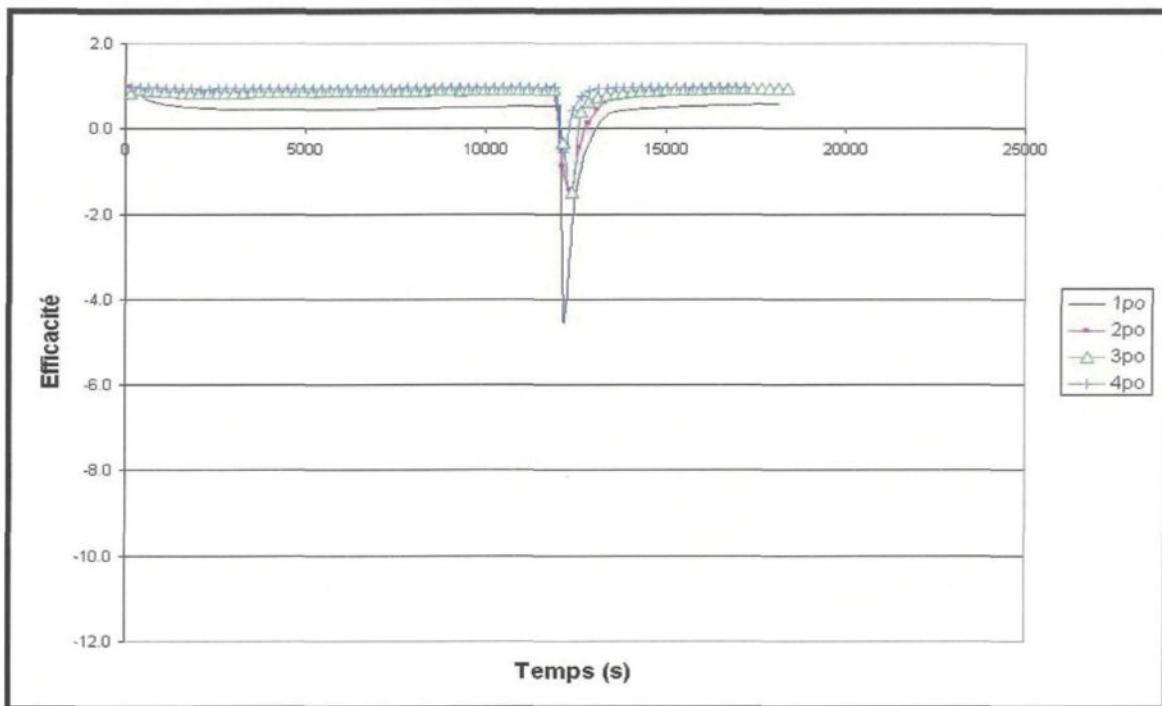


Figure 3.23 : Évolution de l'efficacité série 10 (175 000 inc/kg eau)

Notons que les séries 2, 8 et 10 présentent bien la tendance qui stipule que la relâche est plus élevée pour les lits plus minces.

L'analyse des données sera effectuée plus en profondeur au point 3.5.2. En effet, il sera plus facile de quantifier le nombre d'inclusions de PVC relâchées à l'aide des courbes de déposition totale. Ainsi, aucune erreur d'interprétation ne pourra se produire, entre autre avec les séries 4 et 6 des données, puisque les courbes de déposition totale sont le résultat des calculs de l'aire sous la courbe de déposition à chaque instant. En effet, le fait que pour des lits plus hauts l'efficacité soit moindre que pour des lits filtrants plus bas, comme avec les courbes d'efficacité des séries 4 et 6, peut induire en erreur. Afin d'éviter toute erreur

d'interprétation, ce sont les courbes de déposition totale qui seront analysées, courbes qui calculent la valeur réelle des inclusions relâchées.

3.5 Analyse des courbes de déposition

Afin de se rapprocher du phénomène qui nous intéresse, il est important d'analyser les courbes de déposition obtenues à partir des courbes de concentration à l'entrée et à la sortie du filtre. Présentée au deuxième chapitre de cet ouvrage, la méthode de calcul pour déterminer la déposition totale à l'intérieur du lit filtrant par unité de volume est simple. De plus, afin de faciliter l'analyse des résultats, il a été possible d'alléger l'ordre de grandeur du nombre d'inclusions déposées par unité de volume du lit filtrant en utilisant la notion de valeurs adimensionnées. Il est donc nécessaire d'introduire ici un terme de temps et de déposition adimensionné.

Ainsi, comme il a été vu au chapitre précédent, il est possible d'exprimer la valeur de la déposition instantanée (équation 2.1). Cette valeur donne le nombre d'inclusions déposées à chaque instant. Si la courbe obtenue est intégrée comme il a été présenté au chapitre précédent, il est possible d'obtenir le nombre total des impuretés déposées. En divisant ce résultat par le volume total du lit utilisé, il est alors possible de connaître exactement le nombre d'inclusions déposées dans tout le volume du lit filtrant (σ). Cette valeur de déposition exprimée en nombre d'inclusions par unité de volume sera divisée par la valeur de concentration à l'entrée du système à 6000 secondes multipliée par la densité de l'eau et

par la porosité du lit afin de respecter les unités. Voici, de façon mathématique, l'expression de ce nouveau terme de déposition totale sans dimensions :

$$\bar{\sigma}_{\text{exp}} = \frac{\sigma}{C_0 \rho_i \varepsilon} \quad (3.3)$$

Cette dernière manœuvre mathématique servira à deux fins. Premièrement, vu l'incapacité du système d'obtenir de façon régulière une concentration d'entrée juste à la valeur fixée préalablement, cette manœuvre de normalisation permettra d'établir une seule et même base de comparaison entre les différentes hauteurs de lit testées pour une même série d'essais. De plus, cette manipulation mathématique permettra d'établir des conclusions pour des plus petits nombres, ce qui allègera la lecture des résultats.

Finalement, afin de présenter de manière graphique les résultats obtenus, il est nécessaire de présenter un terme de temps adimensionné.

Ainsi, le temps sans dimensions sera défini par :

$$\bar{t} = \frac{t}{r} \quad (3.4)$$

où

$$r = \frac{L}{u_s} \quad (3.5)$$

« r » étant le temps de résidence de l'eau à l'intérieur du lit filtrant, « L » étant la longueur du lit et « u_s » étant la vitesse superficielle.

3.5.1 En écoulement continu

Les courbes de la déposition totale analysées en nombres adimensionnés (séries 1, 3, 5 et 7) ont été créées afin de vérifier l'impact des paramètres d'opération sur la déposition des inclusions. Les courbes sont présentées ci-dessous afin de faciliter la discussion sur les résultats obtenus (figures 3.24 à 3.27).

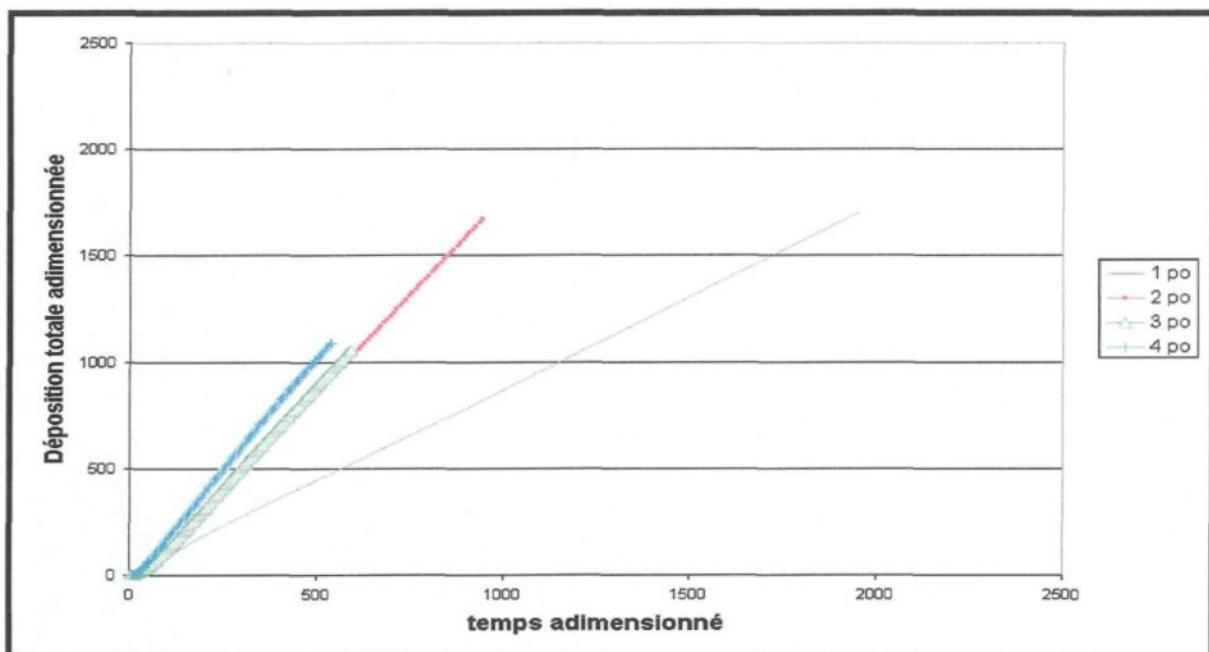


Figure 3.24 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 1 (cond. stand.)

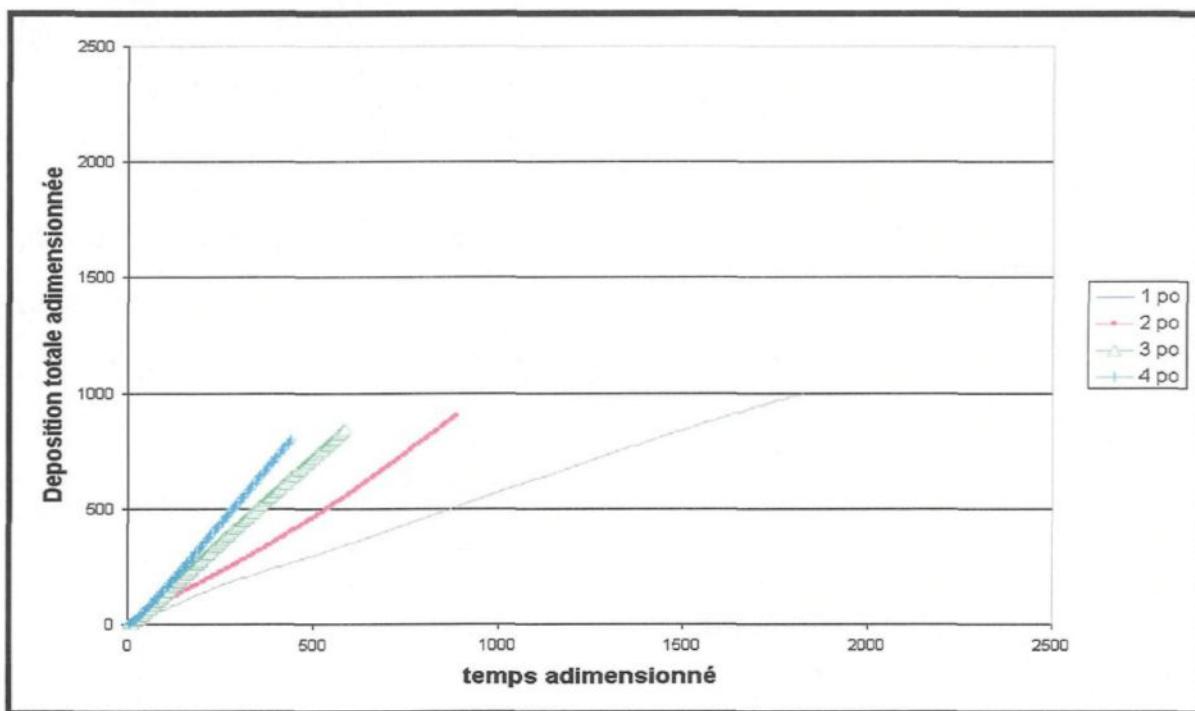


Figure 3.25 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 3 (3-6 mm)

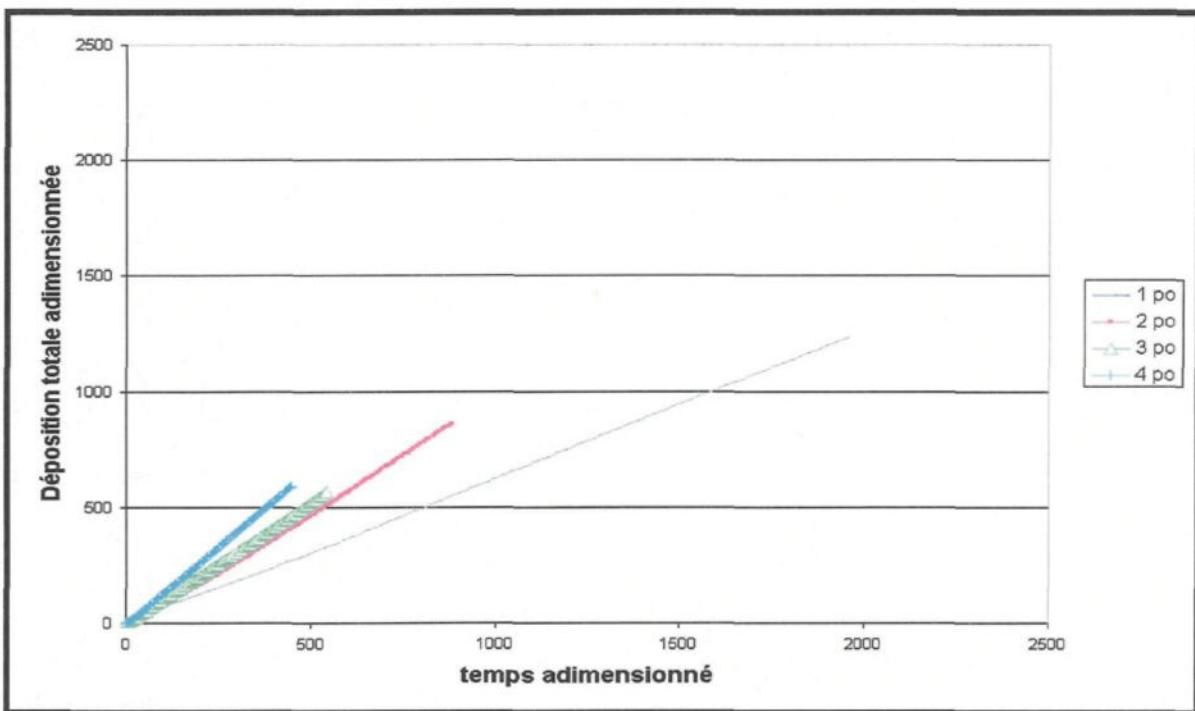


Figure 3.26 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 5 (6-12 mm)

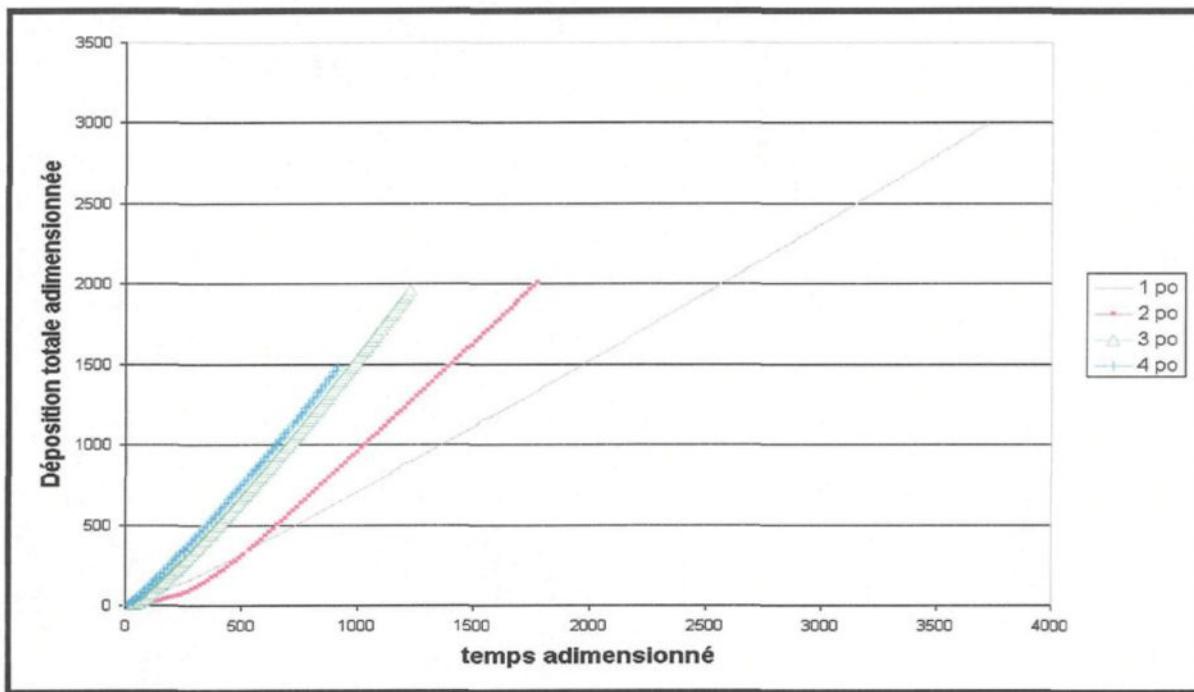


Figure 3.27 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 7 (3.6 mm/s)

Tout d'abord notons que les courbes de déposition totale permettent de conclure que plus le lit filtrant est haut, plus la déposition est favorisée. Effectivement, si une ligne droite est tracée pour n'importe lequel temps donné, il sera possible de constater que le nombre d'inclusions par unité de volume de lit est plus élevé pour les lits plus hauts puisque le taux de filtration augmente avec la hauteur du lit. En se servant de la même ligne droite imaginaire tracée pour un temps donné, il est possible de noter une décroissance de l'espace entre les courbes de déposition totale partant d'un lit d'un pouce jusqu'à un lit de quatre pouces. Cette décroissance est signe que c'est vraisemblablement la couche supérieure du filtre qui accumule le plus d'inclusions. Ainsi, pour un lit d'une hauteur de quatre pouces, c'est la première tranche d'un pouce qui sera la plus active au niveau de la rétention des

impuretés et ainsi de suite. Aussi, de façon générale, pour toutes les séries, la déposition augmente linéairement dans le temps. Le taux net de déposition est donc la pente de chaque courbe présentée ci-haut. Ainsi, à la lumière des résultats obtenus (figures 3.24 à 3.27), il est possible de conclure que plus le lit est haut, plus le taux de déposition net est élevé. Rappelons, à l'aide des principes énoncés dans le chapitre 2 que le taux net de la déposition sera favorisé par une accumulation accrue dans le lit aux dépens du phénomène de relâche qui sera minimisé. Grâce à ce taux net de déposition en nombres adimensionnés, il sera alors possible de comparer l'influence de la grosseur du lit filtrant et de la vitesse de l'écoulement (la concentration en inclusions à l'entrée du système sera évaluée en nombres dimensionnés) et ainsi identifier les paramètres les plus influents. Voici donc un tableau comparatif (voir tableau 3.10) des différents taux net de déposition obtenus pour les série 1, 3, 5 et 7 :

Tableau 3.10 : Taux de déposition net obtenus pour chaque série d'essais $\left(\frac{\partial \bar{\sigma}_{\text{exp}}}{\partial t} \right)$

| # Série | 1 po | 2 po | 3 po | 4 po |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| 1 (cond. stand.) | 0.8674 | 1.8294 | 1.8855 | 2.1214 |
| 3 (3-6 mm) | 0.5449 | 1.0054 | 1.4785 | 1.8691 |
| 5 (6-12 mm) | 0.6341 | 0.9899 | 1.0361 | 1.3357 |
| 7 (3.6 mm/s) | 0.8189 | 1.2330 | 1.6798 | 1.6439 |

Voici l'histogramme à la figure 3.28 des taux nets de déposition obtenus selon la hauteur du filtre :

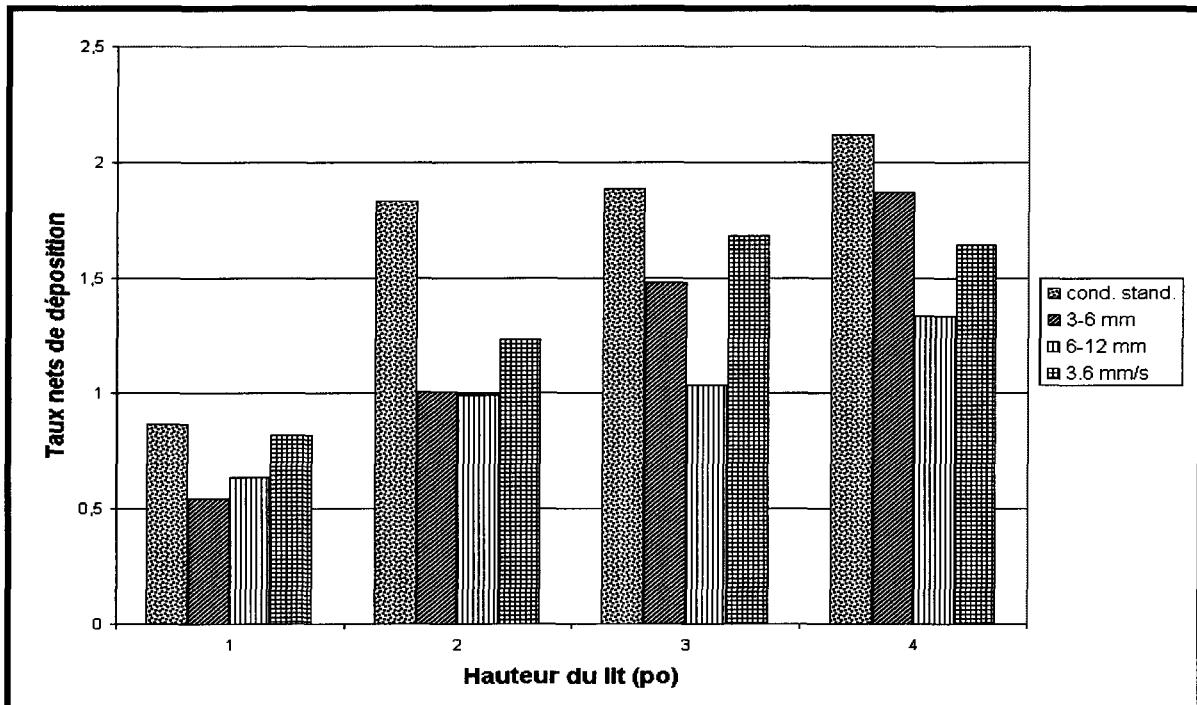


Figure 3.28 : Taux nets de déposition obtenus selon la hauteur du filtre, séries 1, 3, 5 et 7

De façon générale, il est possible de constater que le taux net de déposition augmente lorsque la hauteur du lit augmente. Les tendances démontrent également que plus la taille des grains filtrants est élevée, moins le taux de déposition est prononcé. De plus, si la vitesse de l'écoulement est doublée, l'efficacité de filtration en souffre puisque le taux net de déposition est plus faible qu'aux conditions standards.

Il est possible de remarquer également qu'avec le lit filtrant de grosseur standard, c'est à dire le lit d'alumine 1.5-3 mm de diamètre, le taux net de déposition augmente très peu après 2 pouces de hauteur. Cette tendance semble être présente pour toutes les séries effectuées. Ce fait appuie ainsi la conclusion que la couche supérieure joue un rôle prédominant en ce qui à trait à la capture des inclusions. Fait intéressant à noter, il est possible d'établir une relation directe, à l'aide de la figure 3.25, entre l'ordre de grandeur du changement du taux net de déposition et l'ordre de grandeur du changement de diamètre des grains étudiés pour la série 3 (par rapport aux conditions standards de la série 1, figure 3.24). Ainsi, lorsque la taille des grains filtrants est doublée, le taux net de déposition diminue presque de moitié (37% et 45%) pour les lits de 1 et 2 pouces. Quant aux lits de 3 et 4 pouces, le taux net de déposition est moins affecté par le changement de la granulométrie puisque le changement du taux net de déposition diminue de 22% et de 14% pour les lits de 3 et 4 pouces respectivement. Il semble que l'effet du changement de la taille des grains filtrants pour des lits plus élevés soit plus discret dans le cas de la série 3. Ainsi, il semble possible d'atténuer l'effet négatif de l'augmentation de la taille des grains filtrants en utilisant des lits plus hauts. Le changement du taux net de déposition de la série 5 (figure 3.26) ne semble pas correspondre directement au facteur d'augmentation de la taille des grains qui est de 4. L'ordre de la diminution du taux net de déposition varie plutôt de 27% pour un lit d'un pouce, de 46% pour un lit de 2 pouces, de 45% pour un lit de trois pouces et de 37% pour un lit de 4 pouces. Comme il a été mentionné dans l'étude de l'efficacité de filtration, les grains utilisés pour la série 5 dépassent souvent la taille maximale inscrite dans les spécifications du produit et leur forme est plus ou moins

régulière. Cet aspect du produit peut causer cette divergence de résultats. Mentionnons que ces grains sont souvent utilisés afin de diriger l'écoulement dans le filtre industriel et ne jouent donc pas un rôle significatif dans la rétention des impuretés contenues dans le métal.

Quant à la série où une vitesse d'écoulement plus élevée a été testée (figure 3.27), le taux net de déposition, pour toutes les hauteurs de lit étudiées, est plus faible que ceux de la série effectuée aux conditions standards. Ainsi, pour un lit d'un pouce, la diminution est de 6%, pour un lit de deux pouces, l'ordre de grandeur de la diminution est plutôt de 33%, pour un lit de trois pouces, la diminution se situe aux alentours de 11% et, finalement, pour un lit de quatre pouces, la diminution du taux net de déposition est de 23%. Ici, même si la vitesse est doublée, la diminution du taux net de déposition ne diminue pas d'un facteur 2. Il est difficile de relier directement l'augmentation de la vitesse de l'écoulement à la quantité de matière déposée dans le filtre. En effet, même si la vitesse d'écoulement est doublée, elle n'est pas considérée comme une vitesse excessive. Ainsi, en doublant le débit, la quantité de matière qui passe à travers le filtre est augmentée mais cette augmentation de vitesse provoque également une baisse du temps de contact entre les inclusions et les grains filtrants due essentiellement à l'augmentation d'intensité des forces de traînée à l'intérieur du filtre. De cette façon, la légère baisse du taux net de déposition pour chaque hauteur de lit pourrait être expliquée ainsi.

Quant au changement du taux net de déposition en réaction au changement de concentration, il n'est pas possible de les comparer sur une base adimensionnée puisqu'il sera alors difficile de déterminer l'impact du changement de concentration sur le taux net

de déposition. En effet, dans l'analyse adimensionnée on doit diviser les résultats de la déposition par la valeur de la concentration initiale. Si, par exemple, pour une concentration d'entrée du système sept fois plus élevée, la déposition est sept fois plus élevée et que l'on divise cette valeur par la concentration initiale qui sera sept fois plus élevée qu'aux conditions standards, alors le taux net de déposition sera le même. Le contraire est démontré dans l'analyse dimensionnée. Voici les graphiques et tableaux nécessaires à l'étude de l'impact du changement de concentration pour la déposition (figures 3.29).

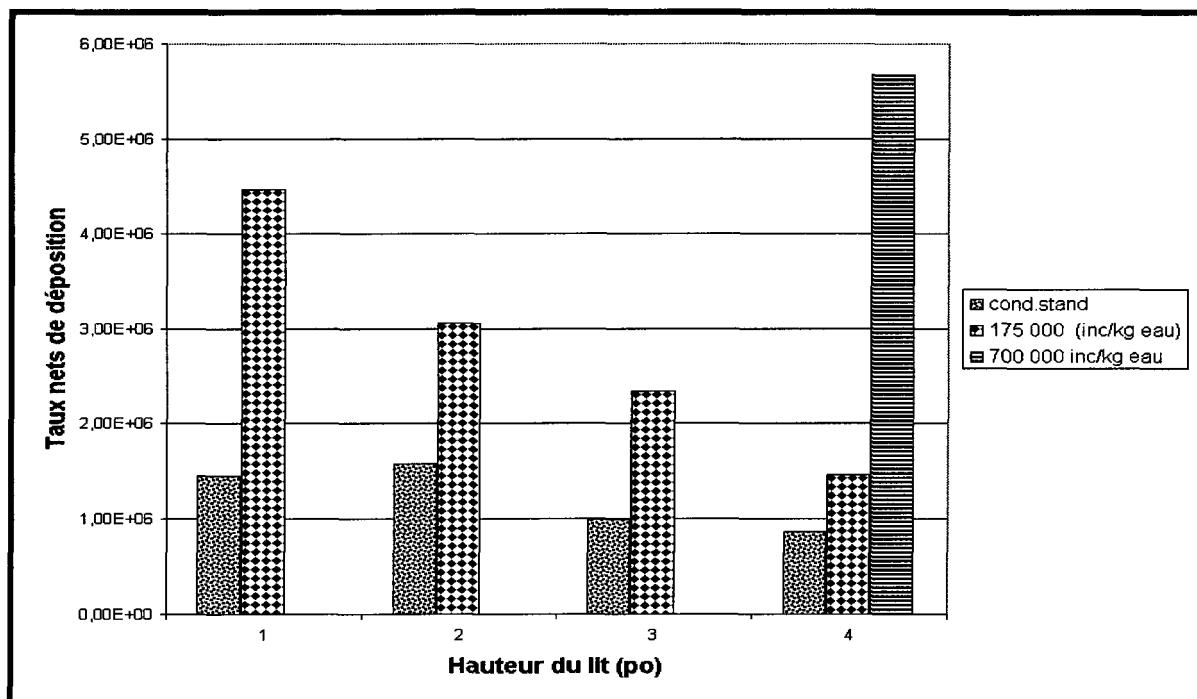


Figure 3.29 : Taux nets de déposition obtenus selon la hauteur du filtre, séries 1, 9 et 11

L'analyse est plus difficile à exécuter pour ce qui est du comportement du taux net de déposition en fonction de la hauteur du lit. Dans l'analyse adimensionnée il est possible de

remarquer que le taux net de déposition augmente lorsque la hauteur du lit augmente alors que dans l'analyse dimensionnée, les tendances à ce niveau sont moins évidentes puisque les résultats ne sont pas tous comparables vu l'instabilité du système et la variabilité de la valeur de la concentration d'entrée entre chaque essais (voir figure 3.29). Cependant, l'analyse dimensionnée permet de reconnaître que le taux de déposition est en moyenne plus élevé qu'aux conditions standards et suit l'ordre de grandeur du changement de la concentration d'entrée. en effet, pour la série 9, dont la concentration d'entrée est augmentée d'un facteur de 1.75, on remarque que la moyenne de l'augmentation des taux de déposition se situe aux alentours de 2.25, ce qui est comparable. De la même façon, pour une concentration d'entrée sept fois supérieure à la concentration d'entrée utilisée aux conditions standards, l'augmentation du taux de déposition est supérieure de 6.6 fois, ce qui est comparable également. Rappelons que la déposition est proportionnelle à la concentration d'inclusions (voir équation 1.10). Ceci est clairement observé dans le cas du lit de 4 pouces.

Voici sous forme de tableau (tableau 3.11) les valeurs d'écart obtenues par rapport aux conditions standards.

Tableau 3.11 : Résumé des écarts (en %) obtenus du taux net de déposition par rapport aux conditions standards - écoulement continu

| Série | 1 po | 2 po | 3 po | 4 po |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3 (3-6 mm) (base adim.) | -37 | -45 | -22 | -14 |
| 5 (6-12 mm) (base adim.) | -27 | -46 | -45 | -37 |
| 7 (3.6 mm/s) (base adim.) | -6 | -33 | -11 | -23 |
| 9 (175 000 inc/kg eau) (base dim.) | +207 | +94 | +135 | +70 |
| 11 (700 000 inc/kg eau) (base dim.) | X | X | X | +558 |

Ainsi, pour toutes les séries réalisées, les tendances de comportement de la déposition dans le filtre correspondent de manière satisfaisante à ce qui a été observé dans les études antérieures [8,10]. En effet, on note une amélioration du taux de déposition en fonction de la hauteur du lit pour tous les essais, un meilleur taux de déposition est obtenu pour une taille de grains filtrants plus fine, une diminution du taux net de déposition est obtenue lorsque la vitesse augmente, et finalement, lorsque la concentration à l'entrée du filtre est augmentée, il semble que la plupart des valeurs du taux net de déposition soit augmentée également.

3.5.1.1 Commentaire sur l'existence de la relâche

Il est difficile, en se référant aux courbes de déposition totale pour l'écoulement continu de voir l'influence de la relâche. À ce stade de l'analyse, deux hypothèses sont plausibles. En effet, la relâche, pour ce type de système, peut être inexistante et n'affecter en rien le taux net de déposition ou, si elle est présente de façon continue, diminuer le taux net de déposition à chaque instant. Le chapitre 4 présente un modèle supposant la présence de relâche en continu et tente de reproduire les courbes de concentration à la sortie du filtre obtenues expérimentalement.

3.5.2 En écoulement interrompu

De la même façon, pour les tests en écoulement interrompu, les courbes de la déposition totale analysées en nombres adimensionnés (séries 2, 4, 6 et 8) ont été créées afin de vérifier l'impact des paramètres d'opération sur la déposition des particules. Les courbes sont présentées ci-dessous afin de faciliter la discussion sur les résultats obtenus (voir figure 3.30 à 3.33).

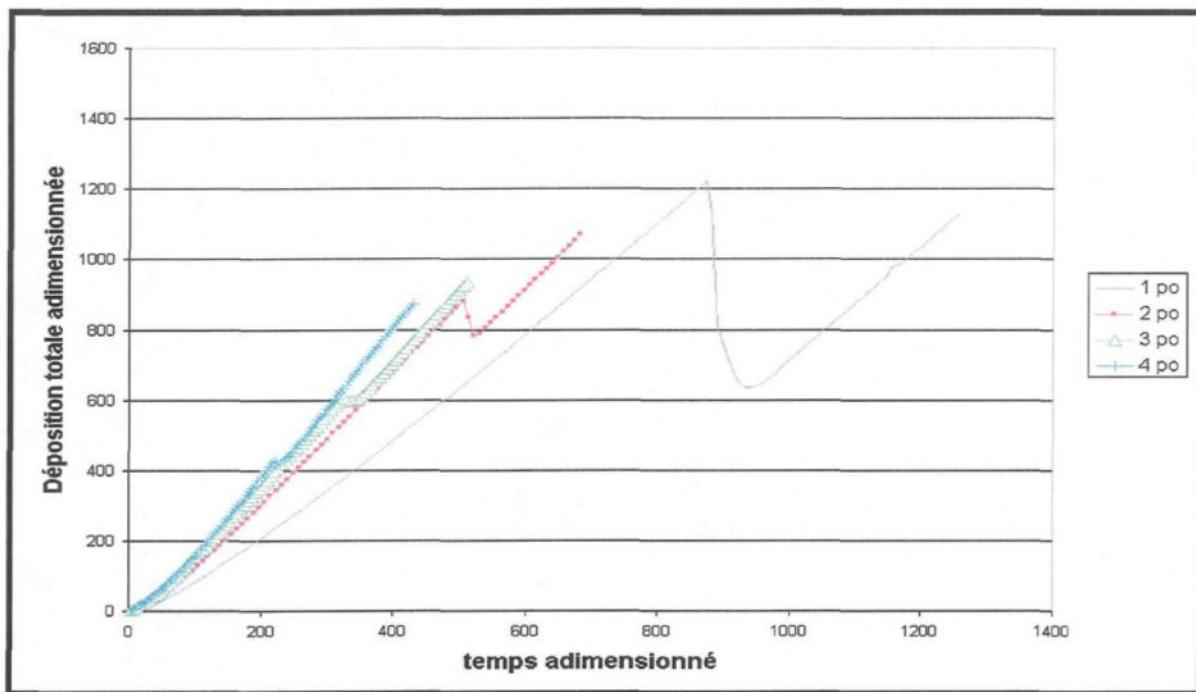


Figure 3.30 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 2 (cond.stand.)

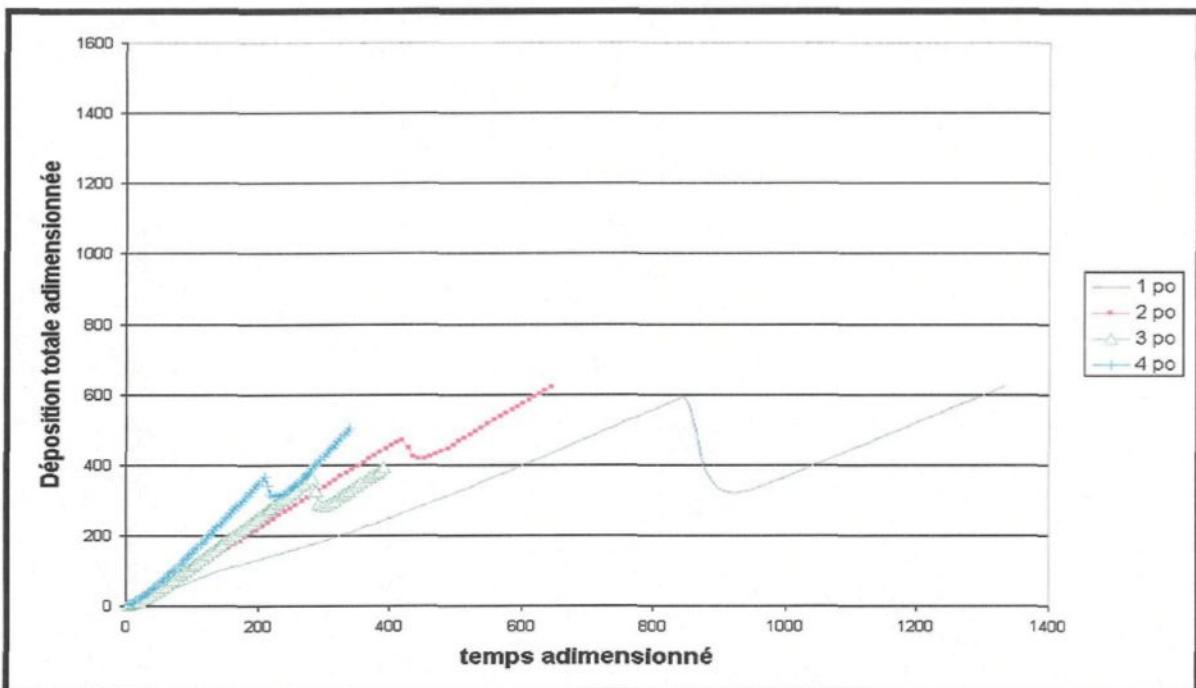


Figure 3.31 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 4 (3-6 mm)

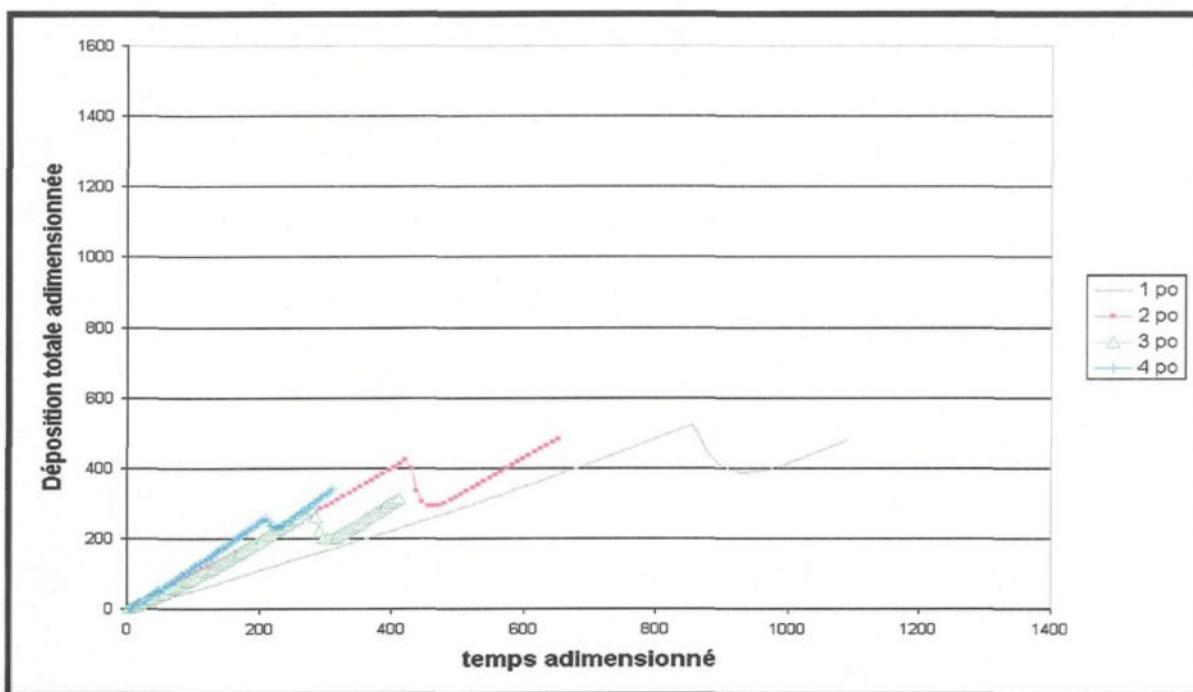


Figure 3.32 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 6 (6-12 mm)

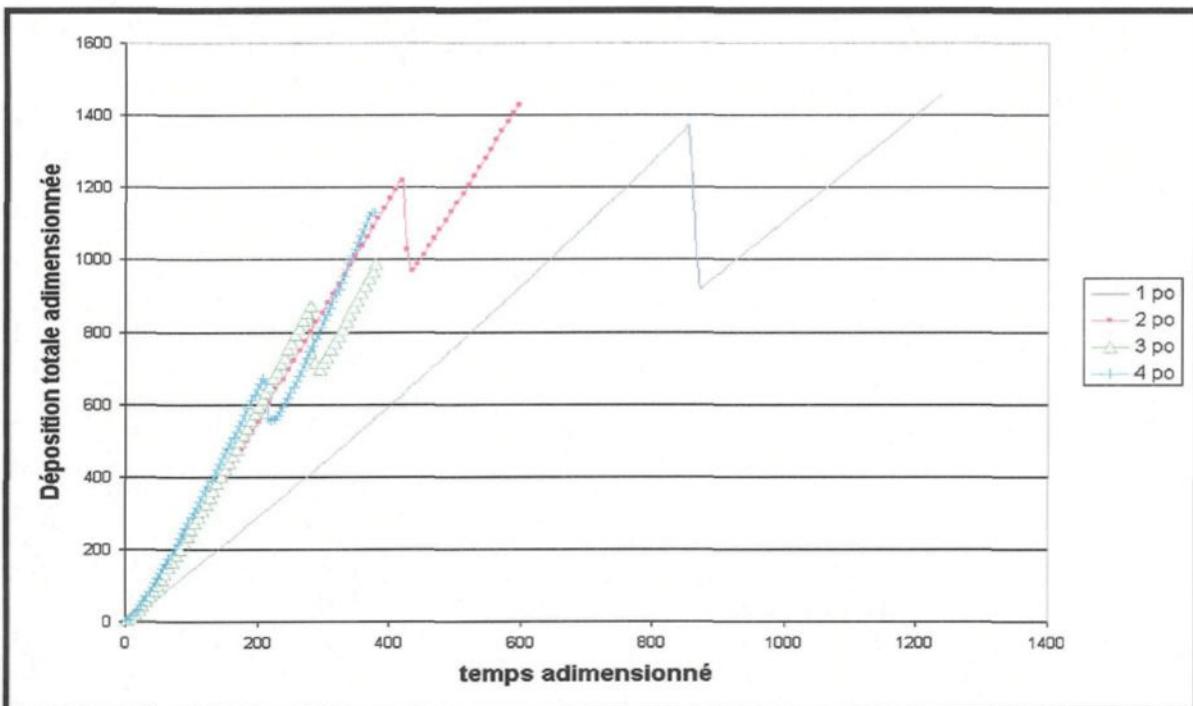


Figure 3.33 : Évolution du nombre total d'inclusions dans le lit filtrant série 8 (3.6 mm/s)

De façon générale, les courbes de déposition totale en écoulement interrompu, démontrent la même tendance que les courbes de déposition totale en écoulement continu. En effet, il est possible de remarquer que plus la hauteur du lit est appréciable, plus la déposition est favorisée. De plus, l'augmentation du taux net de déposition devient de moins en moins prononcée avec l'augmentation croissante de la taille du lit filtrant utilisé. De la même façon qu'en écoulement continu, il est possible de remarquer que la couche supérieure du lit est vraisemblablement celle qui capture le plus d'inclusions dans le processus de filtration.

Une différence de comportement entre la série de tests en écoulement continu et en écoulement interrompu apparaît par contre lorsque l'arrêt de la circulation du fluide est imposé. En effet, les courbes de déposition totale lors du départ de la circulation du fluide, après l'interruption de l'écoulement, démontrent de manière évidente une chute directe de la déposition totale des inclusions. Par définition, cette chute du nombre d'inclusions déposées est en fait la relâche. Cette chute est en fait la différence entre le nombre le plus élevé d'inclusions déposées avant le bris de la courbe de déposition totale qui descend en ligne droite vers l'axe des abscisses. À noter que la chute est toujours considérée comme une ligne droite même si parfois elle présente une certaine inclinaison puisque cette inclinaison est très peu prononcée. Ainsi, lorsque l'écoulement est arrêté, puis reparti, un nombre plus ou moins important d'inclusions capturées précédemment sont retournées dans le fluide selon la hauteur du lit filtrant utilisé. Pour toutes les séries effectuées, on remarque que la relâche est plus significative pour les lits de plus petite hauteur. Cette tendance

s'explique facilement. En effet, pour des lits filtrants plus hauts, les inclusions relâchées par la couche supérieure du filtre auront la chance d'être capturées de nouveau par les couches inférieures de ce dernier. Il est donc possible d'affirmer, par ces résultats expérimentaux, que le procédé de filtration de l'aluminium, qui est semi-continu, est susceptible d'être victime du phénomène de relâche des impuretés capturées précédemment par le filtre, surtout lors d'une interruption d'écoulement du métal liquide pour des raisons de maintenance des équipements ou de procédé. Afin de quantifier le nombre d'inclusions relâchées par unité de lit filtrant, un tableau résumé des séries 2, 4, 6 et 8 à été créé afin de présenter ces valeurs en nombres adimensionnés (voir tableau 3.12) (la série 10 sera étudiée en nombres dimensionnés).

Tableau 3.12 : Quantité de particules relâchées pour chaque essai effectué

| # Série | 1 po | 2 po | 3 po | 4 po |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Série 2.1 Conditions Standards | 586.29 | 102.38 | 10.66 | 7.98 |
| Série 4.1 Alumine 3-6 mm | 273.91 | 54.82 | 82.88 | 57.59 |
| Série 6.1 Alumine 6-12 mm | 133.93 | 134.52 | 90.35 | 28.71 |
| Série 8.1 Vitesse 3.6 mm/s | 446.78 | 263.76 | 193.45 | 128.55 |

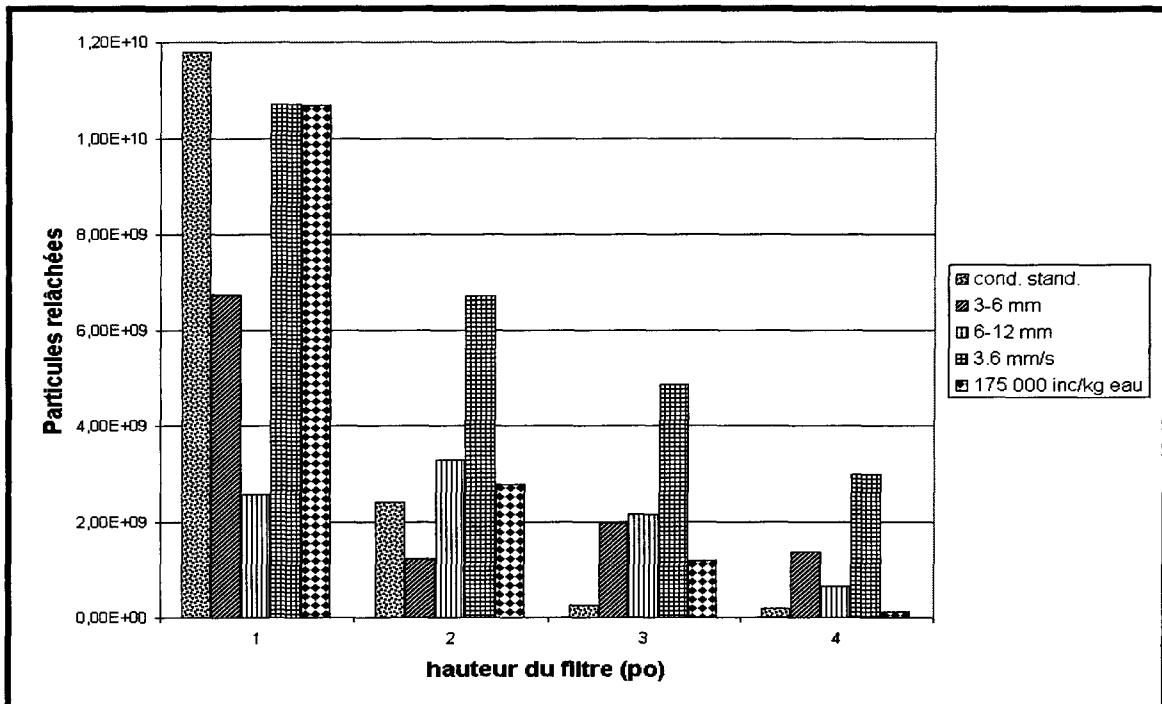


Figure 3.34: Nombre de particules relâchées selon la hauteur du filtre, séries 2, 4, 6, 8, et 10

Afin de commenter les résultats, un histogramme a été produit avec les valeurs dimensionnées (figure 3.34). De cette façon, les tendances sont plus prononcées. Il est alors plus facile de tirer des conclusions sur le comportement du filtre.

Ainsi, pour toutes les séries effectuées, de façon générale, le nombre d'inclusions relâchées décroît avec l'augmentation de la hauteur du lit. Dans le cas de la série effectuée aux conditions standards (figure 3.30), le nombre d'inclusions relâchées décroît de près de 84% lorsqu'un lit de 2 pouces est utilisé en comparaison avec un lit d'un pouce. Pour un lit filtrant de 3 ou 4 pouces, la diminution atteint presque 100%. Si l'histogramme est observé (figure 3.34), on remarque que la relâche diminue lorsque la hauteur du lit augmente. Il est

même possible de supposer qu'un lit de 3 ou 4 pouces dans ces conditions est équivalent pour prévenir la relâche. Dans le cas de la série 4 (figure 3.31), où un lit de particules d'alumine de 3 à 6 mm de diamètre est testé, la diminution lorsque 2 pouces de lit est utilisé (en comparaison avec un lit de 1 pouce) est d'environ 80% alors que la diminution est moins élevée que la série 2 lorsque la comparaison entre un lit de 3 ou 4 pouces est effectuée avec un lit d'un pouce. Cette diminution s'élève plutôt à 70% pour un lit de 3 pouces et à 79% pour un lit de 4 pouces. Cette légère déviation par rapport à la tendance n'est pas significative et est probablement due à l'instabilité du système expérimental. Il est possible de dénoter que la quantité d'inclusions relâchées est moindre qu'aux conditions standards (environ 50% de moins) pour ce qui est des essais de 1 et 2 pouces et est plus élevée pour les essais effectués avec des lits de 3 et 4 pouces (augmentation de 6.5 fois et de 6.25 fois respectivement la valeur obtenues aux conditions standards). Dans le cas des essais pour 1 et 2 pouces, la diminution de la relâche par rapport à la série 2 s'explique probablement par le fait que le lit formé de particules filtrantes plus grossières n'a pas la même capacité de rétention que le lit standard et, donc, puisque la déposition est moindre, la relâche est moindre également. Pour les lits de 3 et 4 pouces, la relâche est plus élevée que pour les lits filtrants correspondants aux conditions standards. Encore une fois ici, le fait que les particules filtrantes soient plus grossières permet de croire que même si la déposition est moindre qu'aux conditions standards, la capacité de retenir les inclusions dévalant des couches supérieures du lit est également plus faible que pour les particules filtrantes de 1.5 à 3 mm de diamètre. Grâce à l'histogramme, il est possible de remarquer

avec cette série, que la capacité de rétention atteint un maximum à partir d'une hauteur de lit de 2 pouces.

Dans le cas de la série 6 (figure 3.32), la tendance semble la même. Pour le lit d'un pouce, la relâche est moindre qu'aux conditions standards (diminution de 77%) pour la même hauteur de lit. Pour les lits de 2, 3 et 4 pouces, la relâche est plus élevée qu'aux conditions standards (augmentation de 31%, 718% et 263%). Ainsi, le comportement de cette série pourrait s'expliquer par les mêmes raisons que par celles évoquées pour la série 4. Le fait que la relâche ne se comporte pas de la même façon dans les séries 4 et 6 que la relâche dans la série 2 (i.e décroissance de la relâche avec la croissance de la hauteur du lit) relève probablement des erreurs expérimentales présentées précédemment dans le texte. Notons enfin que la relâche est, de façon générale, moins élevée pour la série 6 que pour la série 4 et 2. Cette tendance est compréhensible puisque la série 6 a été effectuée pour des grains de taille allant de 6 à 12 mm, grains qui retiennent nettement moins bien les inclusions de PVC que les autres tailles de grains filtrants et sont donc moins efficaces. Rappelons aussi que moins l'accumulation est bonne, moins la relâche des inclusions accumulées précédemment est flagrante. Dans ce cas-ci, il est aussi possible d'affirmer que peu importe la hauteur du lit, la capacité de rétention reste environ la même. En effet, il semble impossible de réduire la relâche en augmentant la hauteur du lit (limite à 4 pouces) puisque la relâche est la même pour le lit de 2 pouces par rapport au lit d'un pouce, elle diminue d'environ 33% pour le lit de 3 pouces et diminue de 78% pour un lit de 4 pouces (cette dernière valeur de diminution peut être considérée comme étant affectée par l'instabilité du système).

Quant à la série 8 (figure 3.33), il est possible de remarquer que la relâche est, semblable à celle obtenue aux conditions standards pour un lit d'un pouce, qu'elle augmente de 157% pour un lit de deux pouces, de 171% pour un lit de 3 pouces et de 151% pour un lit de 4 pouces. Il est normal de dénoter cette tendance d'augmentation de relâche avec cette série puisque les essais sont effectués à une vitesse d'écoulement de 3.6 mm/s. En effet, même si le filtre retient moins de matière lorsque la vitesse de l'écoulement est doublée la relâche est quand même plus élevée puisque lorsque la vitesse d'écoulement est augmentée, la capture d'inclusions qui se détachent du lit est plus difficile. Quant à la diminution de la relâche en fonction de la hauteur du filtre elle est de 40% pour le lit de 2 pouces, de 57% pour le lit de 3 pouces et de 71% pour le lit de 4 pouces par rapport au lit d'un pouce. Il semble, dans ce cas, qu'il faudrait expérimenter des lits plus hauts pour connaître un maximum de rétention.

Finalement, pour la série 10 (figure 3.34), série où la concentration d'entrée du système est augmentée à 175 000 inclusions par kg d'eau, il est possible d'affirmer que la relâche est, en général, semblable à la relâche obtenue aux conditions standards. En effet, on observe une légère baisse de la relâche de 9% pour le lit d'un pouce, une augmentation de 15% pour le lit de 2 pouces, une augmentation de 3 fois la valeur obtenue (364%) pour un lit de 3 pouces et une baisse de 36% pour un lit de 4 pouces. Mise à part l'écart obtenu pour 3 pouces qui est une conséquence de l'instabilité du système, on peut affirmer que pour cet ordre de grandeur d'inclusions relâchées, les écarts ne sont pas significatifs et démontrent que l'augmentation de la concentration affecte peu le système. On aurait pu s'attendre à

obtenir plus d'inclusions relâchées qu'aux conditions standards puisque l'on sait par l'étude en continu que l'augmentation de concentration en inclusions du système favorise la déposition. Les résultats de relâche pour cet essai sont attribuables à la limite de précision du système expérimental. Quant à la comparaison entre les hauteurs de lit expérimentées, on note une diminution de la relâche de 73% pour un lit de 2 pouces, une diminution de relâche de 58% pour un lit de 3 pouces et d'une diminution de relâche de 90% pour un lit de 4 pouces en comparaison au filtre d'un hauteur de un pouce. La décroissance de la relâche est, si on exclue le résultat pour le lit de 3 pouces, semblable à la série 2 (cond. stand.). À noter que l'histogramme est ici le seul outil valable pour effectuer des comparaisons puisque les valeurs ne sont pas adimensionnées et ne sont donc pas ramenées à une même valeur de concentration d'entrée. On ne peut utiliser l'outil des nombres adimensionnés pour comparer la relâche soumise à une concentration plus élevée car les conclusions seront faussées. Dans le cas de la série 10, le fait de diviser par une valeur de concentration plus grande ne permet pas de déceler les vraies tendances. C'est pourquoi la comparaison est uniquement effectuée à l'aide de l'histogramme. Voici, aux tableaux 33 et 34 les pourcentages d'écart obtenus pour chaque série comparée aux conditions standards et, par la suite, pour chaque hauteur d'une même série.

Tableau 3.13: Résumé des écarts (en %) obtenus du nombre adimensionné d'inclusions relâchées par rapport aux conditions standards - écoulement interrompu

| # Série | 1 po | 2 po | 3 po | 4 po |
|--|------|------|------|------|
| Série 4 (3-6 mm) (base adim.) | -50 | -50 | +654 | +625 |
| Série 6 (6-12 mm) (base adim.) | -77 | +31 | +718 | +263 |
| Série 8 (3.6 mm/s) (base adim.) | -24 | +157 | +171 | +151 |
| Série 10 (175000 inc/kg eau) (base dim.) | -9 | +15 | +364 | -36 |

Tableau 3.14: Résumé des écarts (en %) obtenus du nombre d'inclusions relâchées par rapport au lit d'un pouce - écoulement interrompu

| # Série | 1 vs 2 po | 1 vs 3 po | 1 vs 4 po |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Série 2 (cond. stand.) | -84 | -98 | -98 |
| Série 4 (3-6 mm) | -80 | -70 | -79 |
| Série 6 (6-12 mm) | 0 | -33 | -78 |
| Série 8 (3.6 mm/s) | -40 | -57 | -71 |
| Série 10 (175000 inc/kg eau) | -73 | -58 | -90 |

3.5.2.1 Commentaire sur l'existence de la relâche

Grâce aux courbes de déposition il est possible de conclure que la chute de la déposition totale au cours des essais effectués en écoulement interrompu est associée au phénomène de relâche. En effet, une baisse de la déposition totale est signe de la présence de la relâche. C'est au prochain chapitre qu'un modèle servant à reproduire les courbes de concentration d'entrée et de sortie du système est présenté. Ce modèle, en reproduisant les courbes de concentration permet, par le fait même, d'exprimer la relâche en écoulement interrompu et d'en relever les expressions cinétiques.

CHAPITRE 4

MODÈLE UNE DIMENSION D'ACCUMULATION ET DE RELÂCHE

4.1 Introduction

Le présent chapitre a pour but de présenter un modèle permettant de reproduire les courbes de concentration à la sortie du filtre et les courbes de déposition totale obtenues expérimentalement afin de déterminer les termes mathématiques d'accumulation, de relâche en écoulement continu et finalement de relâche en écoulement interrompu. Une fois ces courbes reproduites, il est alors possible de relever les expressions mathématiques exprimant le terme d'accumulation, le terme de relâche en écoulement continu et le terme de relâche en écoulement interrompu exprimant le bilan de masse des inclusions autour du filtre étudié. Ce chapitre présente également les résultats de simulations obtenus et la comparaison de ces derniers aux résultats expérimentaux présentés au chapitre précédent. Le modèle proposé repose sur des hypothèses qui sont présentées dans le texte qui suit.

4.2 Développement du modèle mathématique

Le modèle mathématique qui sera présenté dans le texte qui suit permet de simuler le système expérimental utilisé. L'expression du bilan de masse du système étudié est résumé par l'équation 1.2

Ainsi, sachant que la concentration obtenue lors des essais expérimentaux possède les unités suivantes : # inclusions / kg liq, il est approprié de multiplier le premier terme par la densité de l'eau ainsi que par le rapport de l'aire du lit filtrant. De cette façon, on obtient par multiplication de tous ces constantes un premier terme qui possède les unités appropriées (inc/ m³ lit s).

$$\frac{A_l}{A_l} \rho_l u_s \frac{\partial C}{\partial z}$$

où

A_l est l'aire de la section étudiée (par la méthode des différences finies, le filtre est divisé en plusieurs sections)

ρ_l est la densité de l'eau

u_s est la vitesse superficielle

C est la concentration des inclusions par kg d'eau

z est la profondeur du filtre

Le deuxième terme de l'équation doit lui aussi être traité afin d'être exprimé dans les mêmes unités (inc/ m³ lit s). Ainsi, le deuxième terme de l'équation 1.2 sera multiplié par ρ_l et sera exprimé de cette façon :

$$\rho_l \frac{\partial(\varepsilon C)}{\partial t}$$

où

ε est la porosité du filtre

Le troisième terme de l'équation 1.2, $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right)$, possède quant à lui, les unités recherchées (inc/ m^3 lit s):

Ainsi donc, le premier terme de l'équation 1.2 permet de connaître le changement de la concentration en fonction de la profondeur du lit, le deuxième terme permet de connaître la variation de concentration à chaque instant et le dernier terme est la déposition nette, soit la différence entre l'accumulation et la relâche. Avec le traitement d'unité, l'équation 1.2 devient :

$$\rho_l u_s \frac{\partial C}{\partial z} + \rho_l \frac{\partial(\varepsilon C)}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (4.1)$$

Vu l'incapacité du système d'obtenir de façon régulière une concentration d'entrée juste à la valeur fixée préalablement, une manœuvre de normalisation sera effectuée afin de permettre d'établir une seule et même base de comparaison entre les différentes hauteurs de lit testées pour une même série d'essais. Cette manœuvre de normalisation permettra également de diminuer l'ordre de grandeur des résultats obtenus et les erreurs de compilation, ainsi, la comparaison sera plus facile à établir. Ainsi,

Un terme de concentration par unité de volume de lit C_0' est formé

$$C_0' = \frac{C_0 \rho_l A_l u_s}{V_{lit}} = \frac{C_0 \rho_l u_s}{L}$$

où

C_0 = Concentration (#inclusions/kg liq) au temps 6000 secondes.

En divisant chaque terme de l'équation 4.1 par C_0' et en définissant les termes suivants :

$$\bar{z} = \frac{z}{L} \quad (4.2)$$

$$\bar{C} = \frac{C}{C_0} \quad (4.3)$$

$$\bar{t} = \frac{t}{r} \quad (4.4)$$

Où r est les temps de résidence du fluide dans le filtre en secondes.

$$r = \frac{L}{u_s} \quad (4.5)$$

L'équation 4.1 devient alors sans dimensions.

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial z} + \frac{\partial(\varepsilon \bar{C})}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = 0 \quad (4.6)$$

où

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{C_0 L} \quad (4.7)$$

$\bar{\sigma}$ est la déposition adimensionnée

L'équation de la déposition nette est exprimée par la différence entre un terme d'accumulation et un terme de relâche. Afin d'exprimer l'accumulation, la relâche en continu et la relâche en interrompu, trois coefficients différents K_1 , K_2 et K_3 seront supposées pour les phénomènes d'accumulation, de relâche en écoulement continu et de relâche en écoulement interrompu. Ainsi,

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = K_1 C - (K_2 + K_3) \sigma \quad (4.8)$$

où K_1 est le coefficient d'accumulation, K_2 et K_3 sont les coefficients de relâche en écoulement continu et en écoulement interrompu respectivement. Afin de rendre l'équation 4.8 adimensionnée, il suffit de diviser par le terme de C_0' .

$$\frac{1}{C_0} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{t}} = \left(\frac{K_1 L}{\rho_l u_s} \right) \bar{C} - \left[\frac{(K_2 + K_3)L}{u_s} \right] \bar{\sigma} \quad (4.9)$$

Pour simplifier l'écriture :

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{t}} = \bar{K}_1 \bar{C} - (\bar{K}_2 + \bar{K}_3) \bar{\sigma} \quad (4.10)$$

De façon logique il est légitime de penser que lorsque l'écoulement est continu, le coefficient \bar{K}_3 est nul et lorsque l'écoulement est interrompu le coefficient associé à la relâche en écoulement continu \bar{K}_2 est négligeable par rapport au coefficient \bar{K}_3 . Le coefficient \bar{K}_1 est le coefficient relié à l'accumulation des inclusions dans le filtre.

Ainsi, $\bar{\sigma}$ et \bar{C} (voir la description complète en annexe 6) sont les deux variables du système. Grâce aux équations 4.6 et 4.10, il est alors possible de résoudre le système d'équations grâce à la méthode numérique de différences finies qui permettra d'évaluer la distribution de concentration et la déposition nette à chaque instant. Une fois les deux distributions connues, il sera alors possible de comparer les courbes d'évolution de concentration et de déposition avec les résultats expérimentaux. Par le fait même, les coefficients \bar{K}_1 , \bar{K}_2 et \bar{K}_3 qui permettront d'obtenir les courbes les plus ressemblantes aux courbes expérimentales, seront les coefficients qui seront définitivement sélectionnés.

4.3 Description des coefficients K_1 , K_2 et K_3

Les coefficients du modèle sont définis par plusieurs variables qui sont considérées comme étant influentes pour les phénomènes d'accumulation et de relâche. Afin de permettre une meilleure compréhension de la signification de chaque coefficient, les variables formant ces coefficients sont présentées. Ainsi, par la même occasion, le modèle d'accumulation et de relâche sera expliqué.

4.3.1 Coefficient K_1

Ce premier coefficient existe afin d'exprimer le phénomène d'accumulation dans le modèle. L'efficacité de l'accumulation est influencée par la géométrie des grains filtrants et le nombre de ces grains dans toute la surface permettant le passage du fluide. De plus, la déposition est évidemment affectée par l'aire disponible de ces grains filtrants capable de retenir les impuretés. La surface de chaque grain est bien évidemment liée à la géométrie de ceux-ci qui sera supposée dans le modèle. Finalement, selon le modèle proposé dans cet ouvrage, ce premier coefficient est décrit également par la porosité à chaque instant de son évolution selon l'accumulation ainsi que selon la densité du fluide porteur (l'eau en l'occurrence pour le système expérimental étudié). Voici l'expression algébrique de ce premier terme définissant l'accumulation des inclusions dans le lit filtrant :

$$K_1 = k_1 N A_p \varepsilon \rho_l \quad (4.11)$$

N étant le nombre de grains du lit filtrant par volume d'une section de lit, A_p étant l'aire de la face du grain servant à capter les inclusions de PVC, ε étant la porosité du lit à chaque instant dans le processus de filtration et ρ_l étant la densité du fluide porteur qui, dans le cas de cette étude, est l'eau. En résumé, le modèle suggère que l'accumulation est directement proportionnelle au nombre de grains filtrants par volume d'une section du lit, à l'aire capable de retenir les inclusions, à la porosité et à la densité du fluide porteur.

La constante k_1 servira de constante d'ajustement. En effet, cette constante permettra de trouver la valeur exacte de la constante d'accumulation des impuretés. C'est en modifiant cette constante lors des simulations qu'il sera possible de reproduire l'évolution de concentration de sortie ainsi que la déposition totale des essais expérimentaux. La courbe de la concentration d'entrée obtenue expérimentalement sera introduite dans l'algorithme afin de soumettre le filtre de la simulation aux conditions réelles du système. De façon évidente, si le modèle est représentatif, cette constante devrait posséder une valeur proche de l'unité et ce, pour tous les tests effectués, toutes séries confondues. En effet, si la constante k_1 à la valeur de l'unité, il sera alors possible de conclure que l'expression du terme d'accumulation est représentative de la physique du système.

La valeur de N , qui rappelons-le est le nombre de particules par volume d'une section de lit, sera estimée de la façon suivante (rappelons que dans la méthode de différences finies, le lit filtrant est divisé en sections (dans la direction z)).

$$N = \frac{A_l \Delta x (1 - \varepsilon_0)}{V_{gp}} \quad (4.12)$$

Où A_l est l'aire de la section du lit étudié, Δx est l'épaisseur de la section de ce même lit filtrant, ε_0 est la porosité initiale de la section du lit, la porosité étant le rapport de l'espace vide sur le volume total étudié. Ainsi, l'expression de la différence entre l'entier et la valeur de la porosité initiale représente la valeur de l'espace occupé par les grains sur le volume total étudié. Finalement, V_{gp} est l'expression du volume d'un grain propre du lit filtrant, c'est à dire lorsqu'il n'y a aucune inclusion de déposée sur ce grain.

Dans ce modèle, la géométrie adoptée est celle de l'ellipse puisque c'est cette forme qui est représentative des grains filtrants réellement utilisés (voir annexe 5). Ainsi, l'expression du volume du grain aura la forme suivante :

$$V_{gp} = \frac{4}{3} \pi a b_0^2 \quad (4.13)$$

Où a est l'axe le plus long, b est l'axe le plus court (voir figure 4.1). b_0 est donc l'axe au moment où il n'y a encore aucune accumulation d'impuretés sur le dessus de ce grain. Voici la figure 4.1 présentant ces données géométriques. Les valeurs de a et de b_0 ont été déterminées par analyse d'image (voir annexe 5).

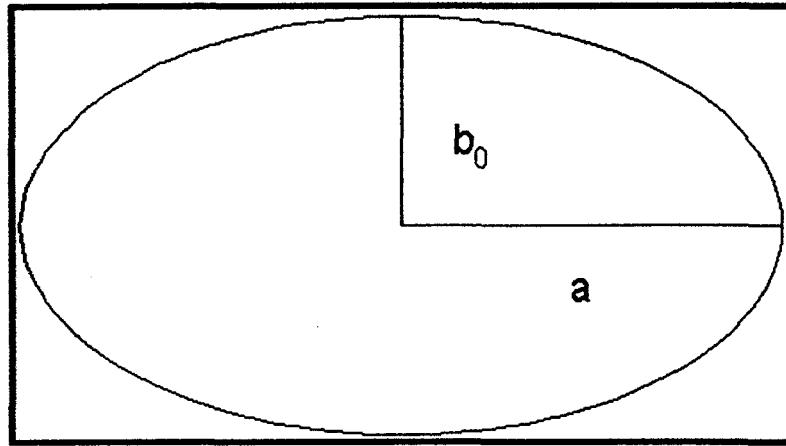


Figure 4.1 : Géométrie d'un grain filtrant modélisé

L'accumulation des impuretés s'effectue sur la partie supérieure de chaque grain. Ainsi, la valeur de b change avec l'accumulation des inclusions.

En ayant opté pour la géométrie de l'ellipse afin de décrire les grains filtrants, l'aire de la surface disponible (A_p) (moitié supérieure) pour capter les inclusions ou impuretés se définit de cette façon :

$$A_p = \pi b^2 + \frac{\pi a b}{\left(\sqrt{a^2 - \frac{b^2}{a}} \right)} \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \right) \quad (4.14)$$

Évidemment, avec le temps la valeur de b changera à cause de l'accumulation croissante des impuretés ou inclusions de PVC sur le grain filtrant comme le démontre la figure 4.2 suivante.

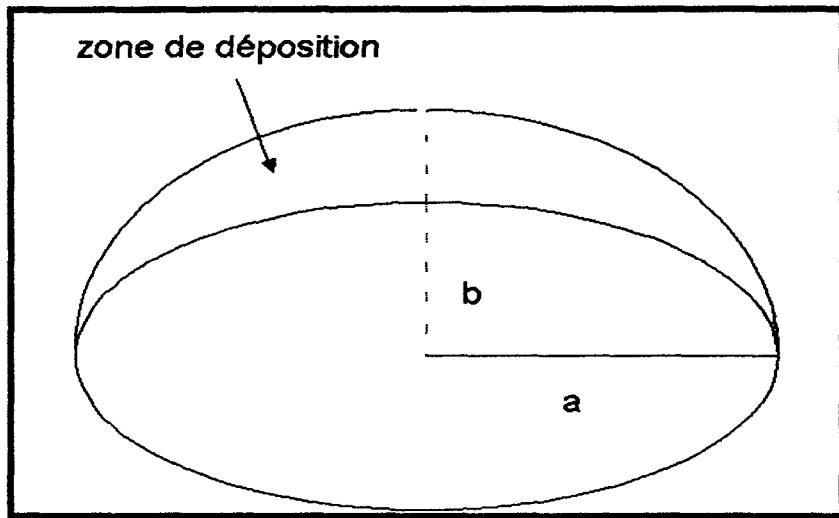


Figure 4.2 : Évolution de la géométrie du grain filtrant avec l'accumulation

Afin de déterminer la valeur de b , il faut nécessairement connaître la variation de volume de l'ensemble des grains filtrants une fois la couche d'impuretés accumulées par volume de section étudiée. Cette information permettra d'obtenir la nouvelle valeur de l'axe b . Ainsi, le volume des grains filtrants de la section du lit étudiée sera :

$$\Delta V_{li} = \frac{\sigma V_i}{1 - \varepsilon_d} (A_l \Delta z) \quad (4.15)$$

où ε_d est la porosité de la couche d'inclusions accumulées. Cette valeur a été estimée, selon la littérature [5], à 0.7. Aussi, puisque les inclusions étudiées sont sphériques, le volume de ces dernières s'exprime par :

$$V_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 \quad (4.16)$$

où le diamètre de l'inclusion est de 25 μm .

Afin de connaître le changement de volume d'un seul grain, l'équation 4.15 est divisée par le nombre de particules dans la section du lit étudiée.

$$\Delta V_{g'} = \left(\frac{\sigma V_i}{1 - \varepsilon_d} \right) (A_l \Delta z) / N \quad (4.17)$$

Le même changement de volume peut être trouvé grâce aux formules de la géométrie elliptique du grain. Le volume d'une demie ellipse est :

$$V_0 = \frac{2}{3} \pi a b_0^2 \quad (4.18)$$

initialement et

$$V_d = \frac{2}{3} \pi a b^2 \quad (4.19)$$

après la déposition.

Le volume déposé est :

$$\Delta V_{g'} = \frac{2}{3} \pi a (b^2 - b_0^2) \quad (4.20)$$

À ce moment, la valeur de b se détermine avec les deux dernières équations 4.17 et 4.20.

Alors :

$$b^2 = b_0^2 + \Delta V_{gf} \frac{3}{2\pi a} \quad (4.21)$$

En connaissant b il devient alors possible de déterminer la valeur de A_p grâce à l'équation 4.14.

4.3.2 Coefficient K_2

Le coefficient K_2 quant à lui, permet de représenter la relâche pour un écoulement continu. La quantité de particules relâchées dépendra encore une fois de la géométrie du grain qui aura capturé précédemment les impuretés. Plus précisément, la relâche sera proportionnelle à la surface de ce grain. Ce coefficient sera également proportionnel au nombre de grains par volume d'une section du lit étudiée. Plus l'aire de la surface des grains et leur nombre sont élevés, plus la déposition est favorisée, par conséquent, plus la relâche risque de se produire à un certain moment dans le processus. Ainsi, le coefficient K_2 se définit de la façon suivante.

$$K_2 = k_2 N A_p \quad (4.22)$$

Où N est le nombre de grains par volume d'une section du lit défini par la formule 4.12 et A_p est l'aire de la surface du grain apte à capturer des inclusions définie par la formule 4.14. Quant à la constante k_2 , elle sert, comme la constante k_1 , de constante de proportionnalité.

4.3.3 Coefficient K_3

Le coefficient K_3 est celui associé à la relâche en écoulement interrompu. Ce coefficient représente le nombre d'inclusions qui se détacheront du lit lorsque l'écoulement dans le système sera arrêté puis repartis. La relâche en écoulement interrompu est un phénomène de détachement des inclusions déposées préalablement sur les grains filtrants. Une partie des impuretés déposées se détachera du grain du filtre et retournera dans le fluide porteur. Ainsi, lorsque l'écoulement est arrêté, le coefficient d'accumulation K_1 et le coefficient K_2 qui représente la relâche en continu sont nuls. En effet, la déposition n'est pas effective lorsque l'écoulement est arrêté, aucune nouvelle entrée de matière dans le filtre n'existe lors de cet arrêt, de la même façon, puisque l'écoulement est arrêté, la relâche en écoulement continu est très faible et le coefficient K_2 n'est pas dominant. C'est au moment où la circulation du fluide est redémarrée qu'un nuage d'inclusions de PVC apparaît à la sortie du filtre. À ce moment, le coefficient K_1 qui représente l'accumulation est effectif, le coefficient K_2 est toujours nul puisque ce dernier représente le cas où l'écoulement n'est pas interrompu et le coefficient K_3 représente alors la relâche des inclusions captées par le tube LiMCA sous le filtre. Ainsi, un volume total d'inclusions

relâchées sera imposé. Ce volume sera réparti sur une plage de temps (t_r) donnée avec la courbe de distribution suivante (voir la description du développement de la courbe normale de distribution en annexe 7):

$$V_r = \left(\tau e^{1-\tau} \right)^\alpha \quad (4.23)$$

où $\tau = t/t_{\max}$

et où t est la durée exprimant la différence entre le temps présent et le moment où l'écoulement a été arrêté.

Les variables manipulées dans le modèle sont donc le pourcentage du volume total d'inclusions relâchées, la plage de temps sur laquelle la courbe de distribution s'étendra et l'exposant α .

Le volume d'inclusions relâchées permettra de déterminer le nombre d'inclusions relâchées par unité de volume du filtre exprimé de la façon suivante :

$$F = \left[\frac{(\Delta V_{gf} N)}{A \Delta z} \right] \left[\frac{1 - \varepsilon_d}{V_i} \right] \quad (4.24)$$

Ainsi, pour chaque pas de temps, une certaine fraction d'inclusions sera relâchée. Cette fraction est représentée par K_3 :

Ainsi,

$$K_3 = \frac{F}{\sigma} \frac{1}{\Delta t} \quad (4.25)$$

K_3 est donc une fonction de la fraction d'inclusions relâchées en un temps donné.

K_3 est donc équivalent à

$$K_3 = \frac{\Delta V_g N}{A_l \Delta z (\varepsilon_0 - \varepsilon) \Delta t} \quad (4.26)$$

Ainsi, pour la relâche en écoulement interrompu, il y aura autant de coefficients K_3 que de pas de temps contenus dans la plage de temps étudiée.

4.4 Précision sur l'évolution de la porosité dans le filtre granulaire

Le changement de la porosité du filtre granulaire lors du processus de filtration dû à la déposition modifiant la structure du réseau est tenu pour compte dans le modèle. Ainsi, l'évolution de la porosité dans le temps est définie de cette manière :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{\sigma V}{1 - \varepsilon_d} \quad (4.27)$$

Donc, à chaque instant de la simulation, la porosité est évaluée et est introduite dans les calculs.

4.5 Algorithme de programmation

Pour fins de résumé, voici l'algorithme utilisé pour ce modèle :

1. Division en 10 sections de chaque pouce du lit filtrant.
2. Calcul de $\bar{\sigma}$ et \bar{C} en utilisant la méthode numériques des différences finies.
 - Calcul de $\bar{\sigma}$ à travers le filtre après avoir déterminé (\bar{K}_1 , \bar{K}_2 et \bar{K}_3) et les autres paramètres.
 - Calcul du profile de concentration \bar{C} à travers le lit.
3. Répétition de l'étape 2 en fonction du temps pour $t = t + \Delta t$.
4. Conversion $\bar{\sigma}$ et \bar{C} pour comparer avec les résultats expérimentaux.

La description des variables \bar{C} et $\bar{\sigma}$ est effectuée à l'annexe 6.

4.6 Présentation des résultats de simulations

La rubrique 4.5 présentera les résultats des simulations obtenus grâce au modèle décrit précédemment. De ces simulations seront calculé les coefficients d'accumulation, de relâche en continu et de relâche en interrompu.

4.6.1 En écoulement continu

Les simulations ont été effectuées afin de trouver pour chaque série une constante unique pour toutes les hauteurs de lit. Ainsi, un seul coefficient d'accumulation et un seul coefficient de relâche sont utilisés pour les quatre hauteurs de lit. Comme l'objectif est de déterminer un modèle d'accumulation et de relâche représentant le comportement du lit pour certaines conditions données, pour les quatre hauteurs, les simulations tentent, pour la même valeur de k_1 et de k_2 , de se rapprocher des résultats expérimentaux. Les résultats de simulations présentés sont choisis en fonction de deux critères d'acceptabilité : Les courbes de déposition totale calculées doivent présenter un écart de 30% ou moins avec les courbes expérimentales, et, la constante choisie doit répondre au premier critère pour les quatre hauteurs de lit. Certains cas ne répondent malheureusement pas à tous les critères. Le cas échéant, la constante (d'accumulation et de relâche) sera choisie en fonction du plus grand nombre de hauteurs de lit qui représentent bien les résultats expérimentaux de la déposition. Afin d'alléger le texte, seuls les graphiques de la déposition totale pour les lits de quatre pouces seront présentés. Voici donc les résultats de simulations obtenus (figures 4.3 à 4.8) et les tableaux (tableaux 4.1 à 4.6) résumant l'écart moyen pour la déposition totale pour les quatre hauteurs de lits différentes. Il est à noter que les simulations sont exécutées de façon dimensionnée afin de pouvoir bien déceler l'effet des paramètres étudiés dont l'augmentation de la concentration d'entrée du système. Il est à noter également que la moyenne de déposition totale n'est comptabilisée qu'après 2000 secondes afin d'atteindre l'état stable du système.

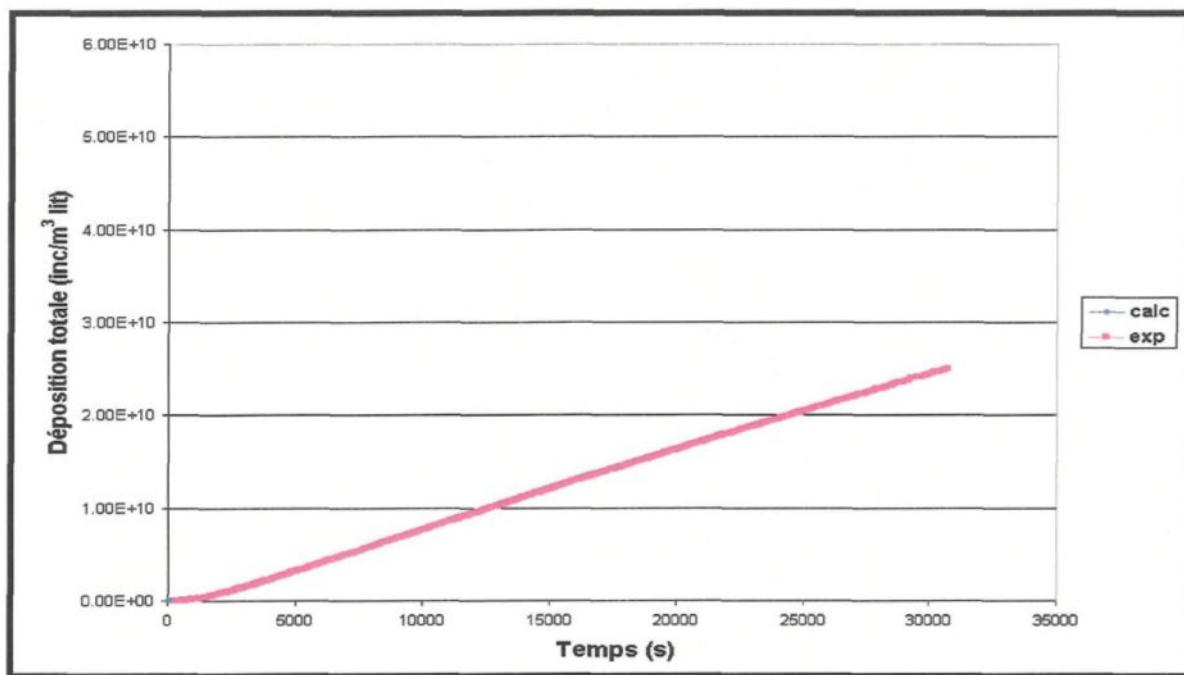


Figure 4.3 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 1-4po (cond. stand.)

*À noter que la courbe de déposition calculée est sous la courbe de déposition expérimentale.

Tableau 4.1 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 1 (cond. stand.)

| Série 1.1 | Moyenne écart déposition totale (%) |
|-----------|-------------------------------------|
| 1 po | 24.0 |
| 2 po | 4.4 |
| 3 po | 4.9 |
| 4 po | 1.5 |

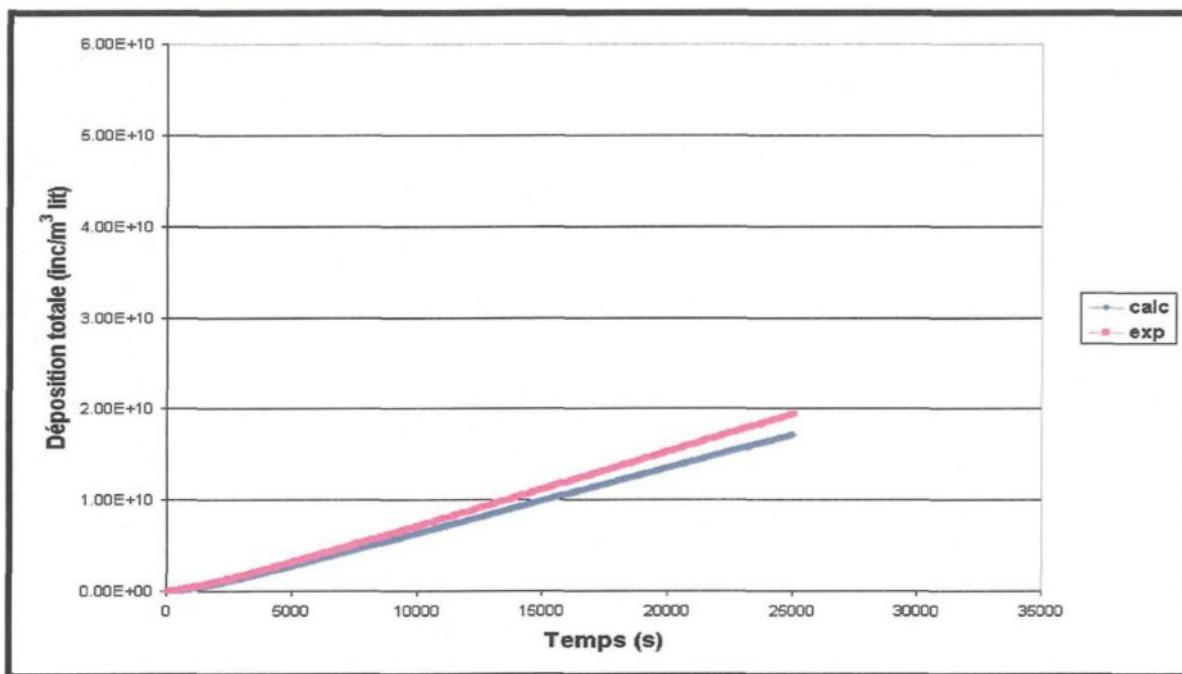


Figure 4.4 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 3-4po (3-6 mm)

Tableau 4.2 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 3 (3-6 mm)

| Série 3.1 | Moyenne écart déposition totale (%) |
|-----------|-------------------------------------|
| 1 po | 7.4 |
| 2 po | 11.5 |
| 3 po | 8.4 |
| 4 po | 11.2 |

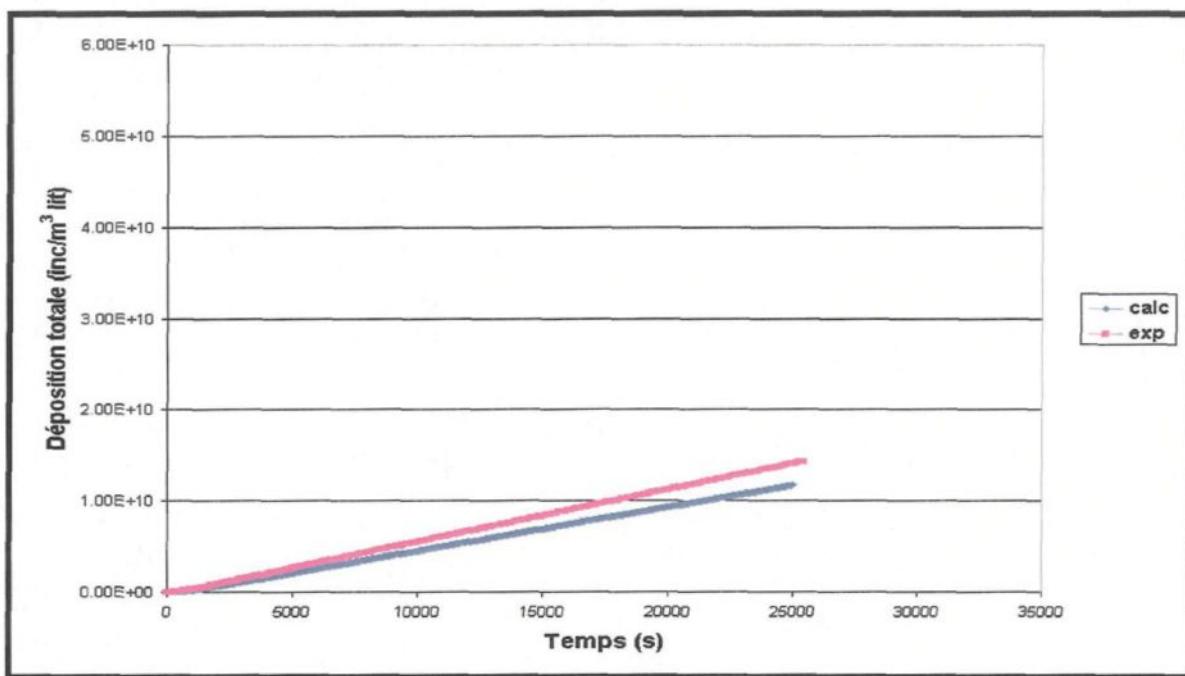


Figure 4.5 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 5-4po (6-12 mm)

Tableau 4.3 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 5 (6-12 mm)

| Série 5.1 | Moyenne écart déposition totale (%) |
|-----------|-------------------------------------|
| 1 po | 48.3 |
| 2 po | 34.6 |
| 3 po | 17.6 |
| 4 po | 18.3 |

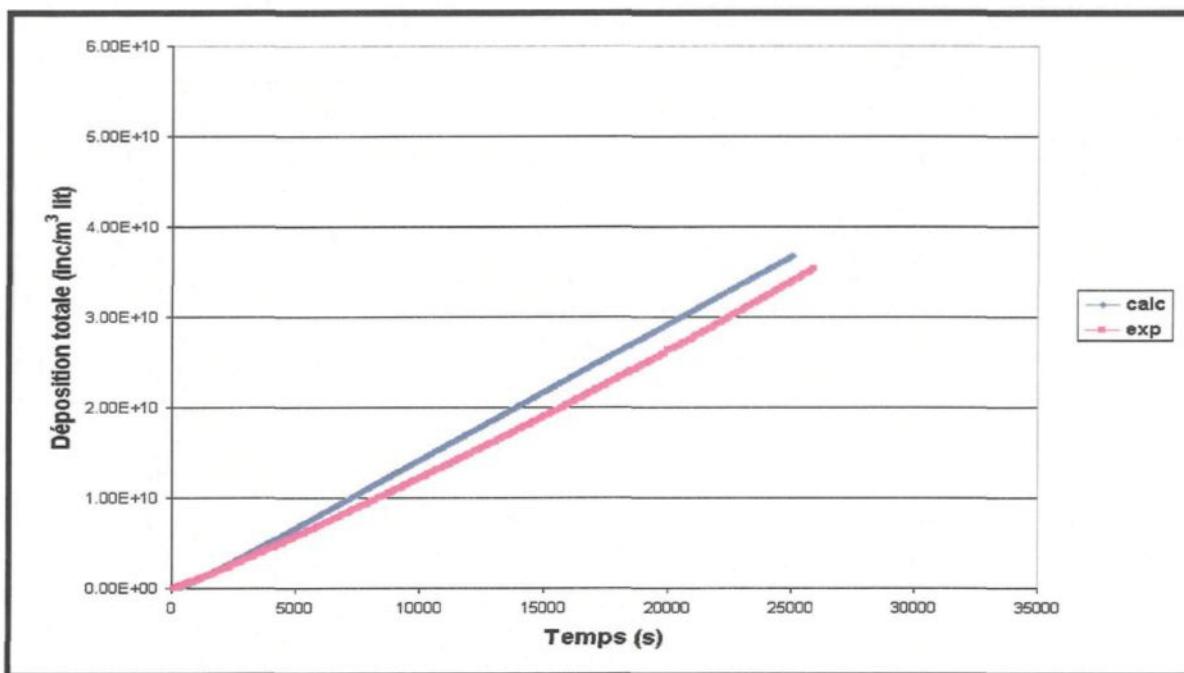


Figure 4.6 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 7-4po (3.6 mm/s)

Tableau 4.4 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 7 (3.6 mm/s)

| Série 7.1 | Moyenne écart déposition totale (%) |
|-----------|-------------------------------------|
| 1 po | 10.3 |
| 2 po | 11.7 |
| 3 po | 11.0 |
| 4 po | 14.6 |

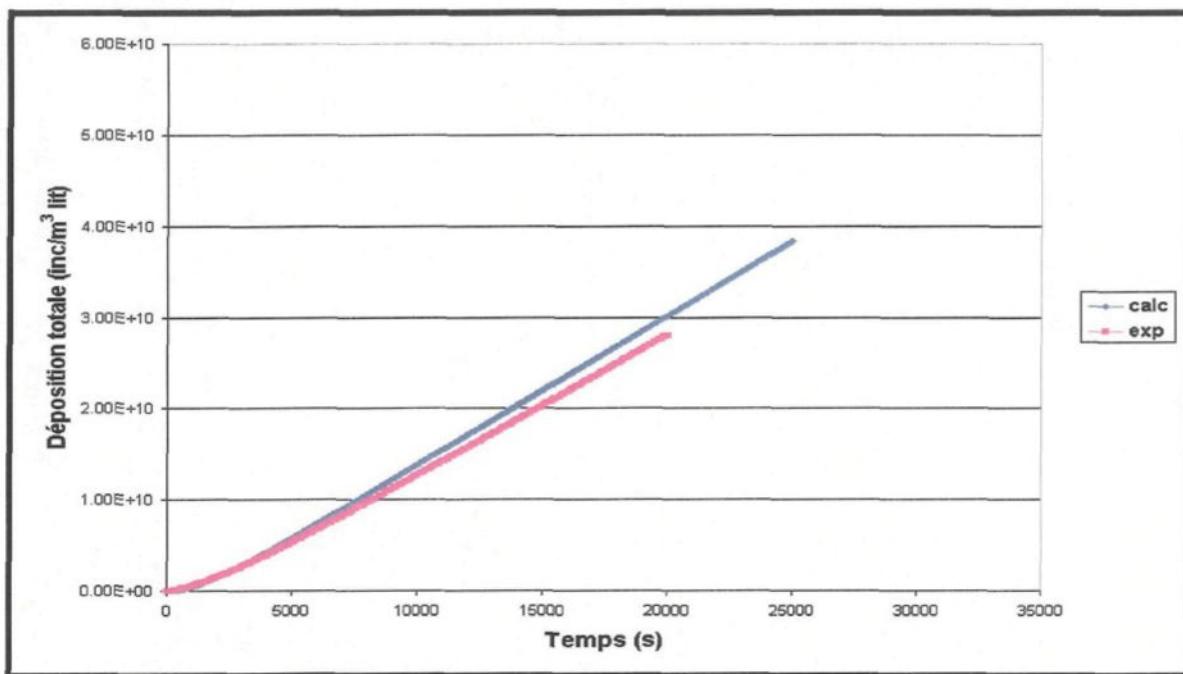


Figure 4.7 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 9-4po
(175 000 inc/kg eau)

Tableau 4.5 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 9 (175 000 inc/kg eau)

| Série 9.1 | Moyenne écart déposition totale (%) |
|-----------|-------------------------------------|
| 1 po | 3.4 |
| 2 po | 1.8 |
| 3 po | 5.7 |
| 4 po | 8.6 |

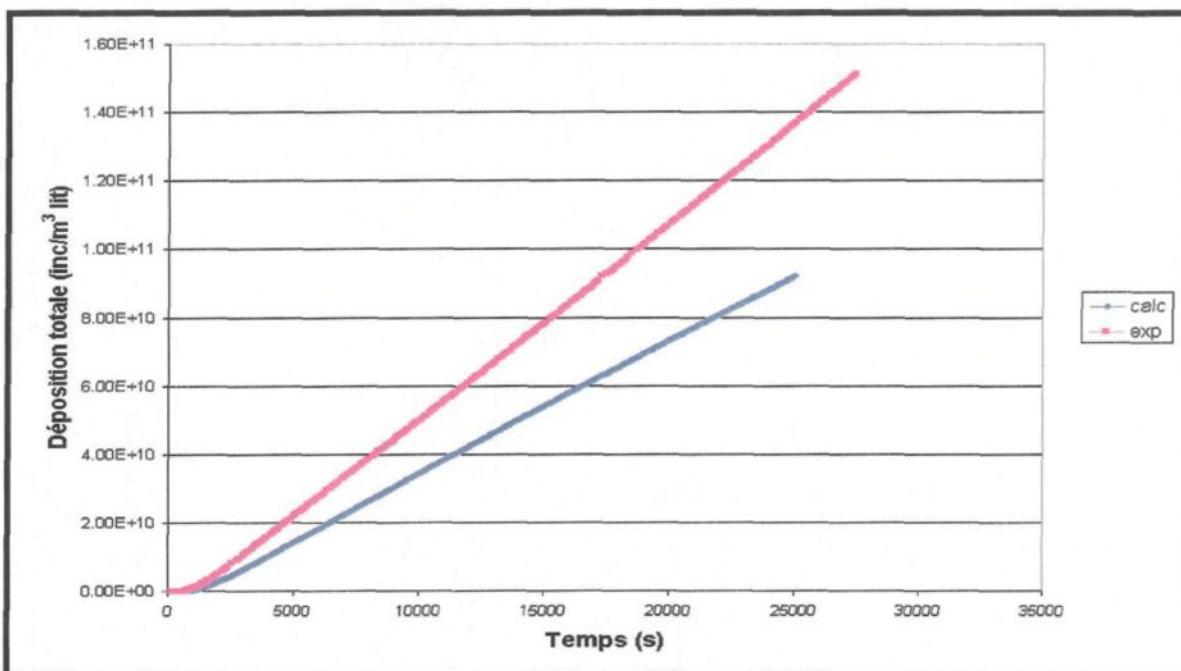


Figure 4.8 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 11-4po (700 000 inc/kg eau)

Tableau 4.6 : Écarts de déposition totale calc. vs exp. série 11 (700 000 inc/kg eau)

| Série 11.1 | Moyenne écart déposition totale (%) |
|------------|-------------------------------------|
| 4 po | 33.5 |

À la lumière de ces résultats, il est possible de conclure que le modèle représente bien la réalité expérimentale. En effet, le modèle répond au critère ultime d'obtenir un écart de moins de 30% pour le comportement de la déposition totale de façon presque unanime. Seuls les lits de un et deux pouces de la série 5 et le lit de quatre pouces de la série 11 dépassent le 30% d'écart maximum pour la déposition totale. Ces trois cas dépassent de 18.3%, 4.6% et 3.5% respectivement la consigne initiale. Dans le cas de la série 5, rappelons que la non uniformité de la taille des grains filtrants peut être la cause de ces écarts. Quant à la série 11, l'écart est minime et peut s'expliquer par les erreurs induites en

expérimentation. Les faibles résultats d'écart démontrent que le modèle représente bien la réalité en écoulement continu et qu'il semble être adapté à toutes les variations de paramètres. Rappelons aussi que l'objectif ultime est de trouver une constante unique d'accumulation et une constante unique de relâche en continu pour les quatre lits pour chaque série. Notons que les écarts auraient pu être minimisés en traitant chaque test individuellement grâce à la grande capacité du modèle mais cela n'aurait pas comblé l'objectif de trouver un coefficient universel pour chaque série d'essais représentant une condition d'opération choisie.

4.6.2 En écoulement interrompu

Les courbes qui suivent sont les résultats des simulations obtenues pour les essais effectués en interrompu. Pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment, seules les simulations des lits de quatre pouces seront présentées (figures 4.9 à 4.13). À la suite de chaque figure, un tableau résumé des écarts obtenus entre les résultats expérimentaux et les simulations est présenté pour chaque hauteur de lit testée. Il est à noter que pour l'écoulement interrompu, seul les points minimaux de chute des courbes de déposition totale ont servi de comparaison pour présenter les écarts entre l'expérimental et le modèle. Le début de la courbe ne présentant pas de différences de comportement d'avec les simulations en continu. Ainsi, d'après les mêmes critères de sélections que ceux des simulations en écoulement continu, les meilleurs résultats sont présentés et les écarts qui les représentent se retrouvent dans les tableaux résumés 4.7 à 4.11.

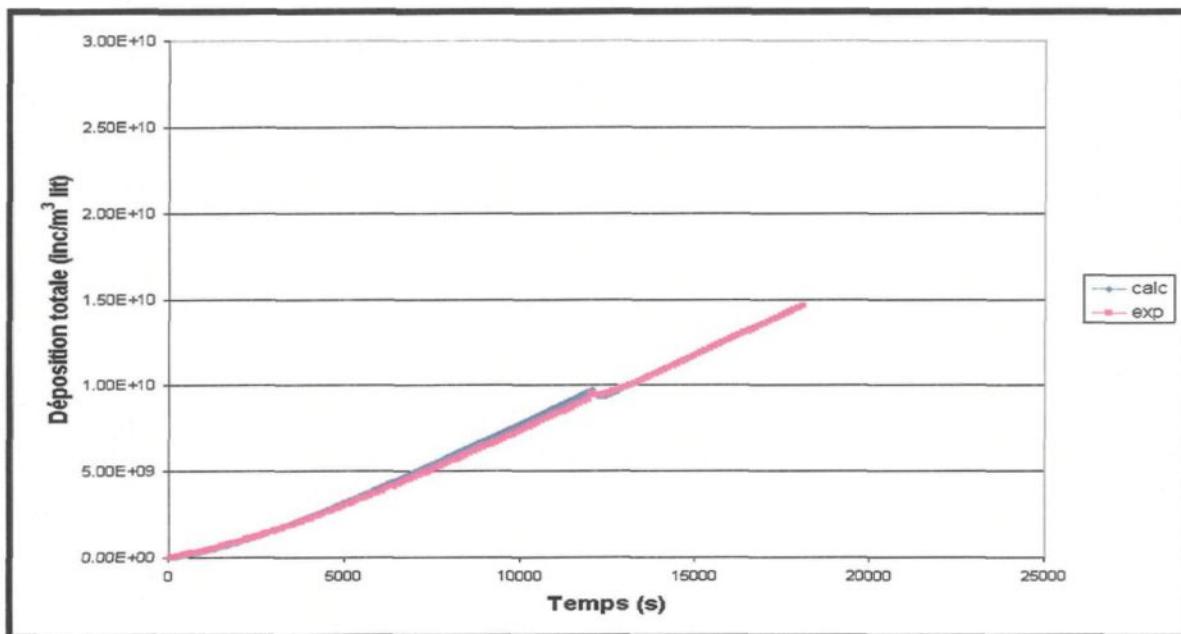


Figure 4.9 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 2-4po (cond. stand.)

Tableau 4.7 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 2 (cond. stand.)

| Série 2.1 | Écart entre le point minimal de chute de la déposition totale (%) |
|-----------|---|
| 1po | 33.6 |
| 2po | 24.7 |
| 3po | 17.0 |
| 4po | 0.9 |

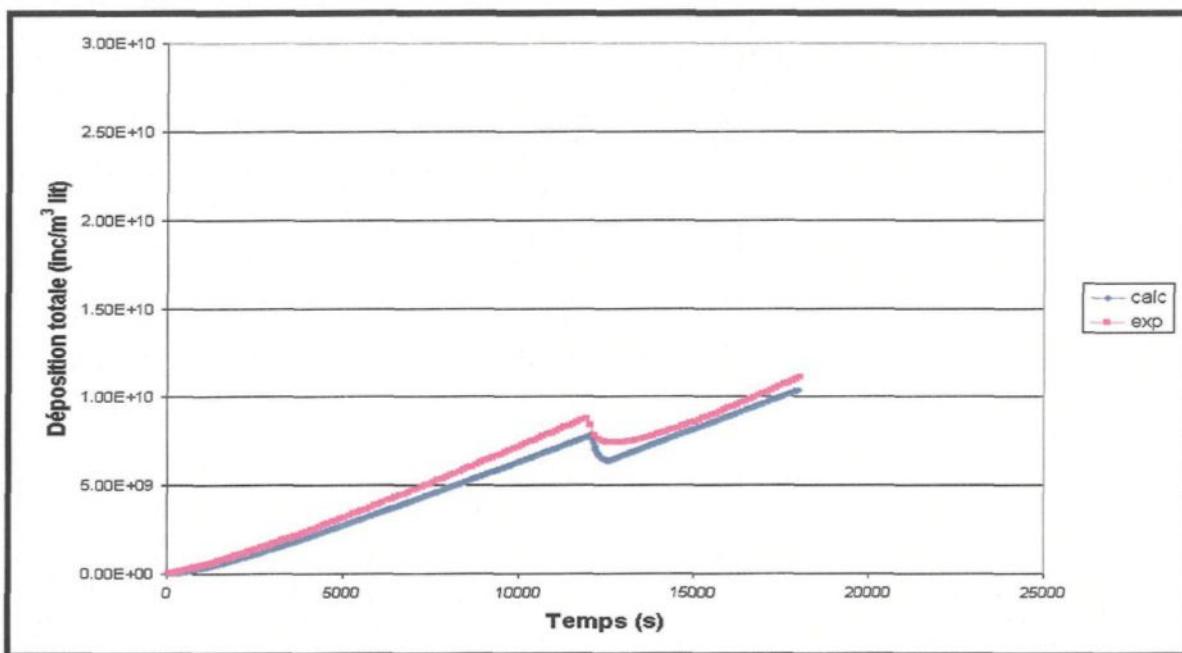


Figure 4.10 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 4-4po (3-6 mm)

Tableau 4.8 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 4 (3-6 mm)

| Série 4.1 | Écart entre le point minimal de chute de la déposition totale (%) |
|-----------|---|
| 1po | 5.0 |
| 2po | 27.4 |
| 3po | 1.0 |
| 4po | 13.6 |

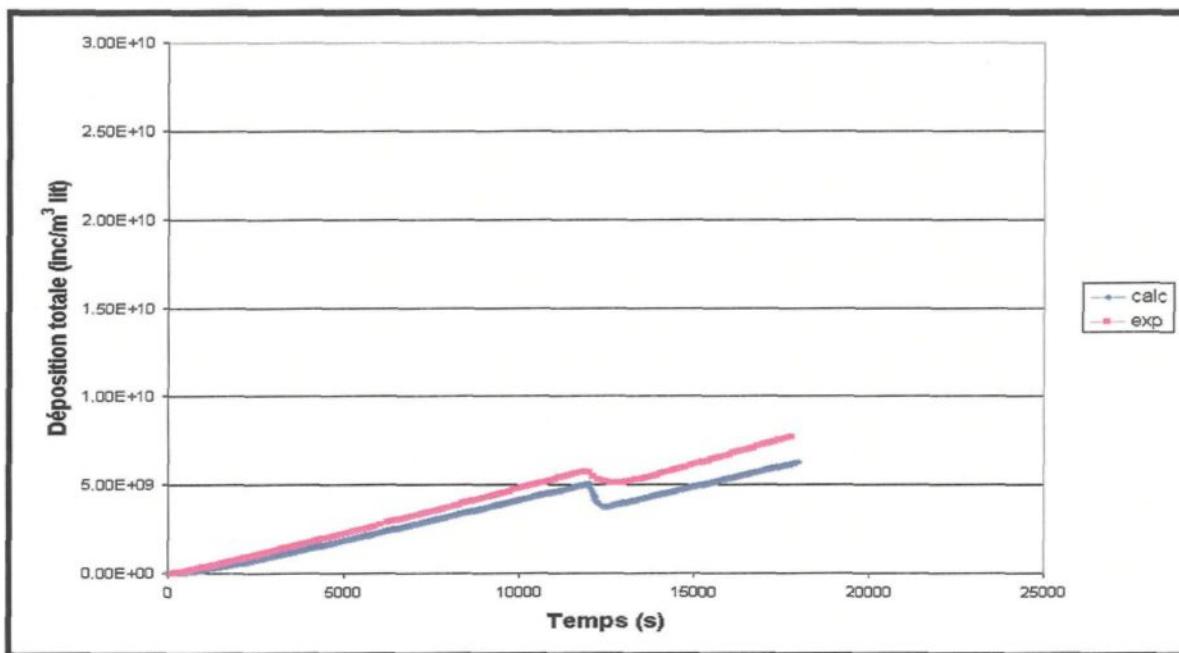


Figure 4.11 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 6-4po (6-12 mm)

Tableau 4.9 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 6 (6-12 mm)

| Série 6.1 | Écart entre le point minimal de chute de la déposition totale (%) |
|-----------|---|
| 1po | 53.8 |
| 2po | 38.4 |
| 3po | 14.2 |
| 4po | 27.2 |

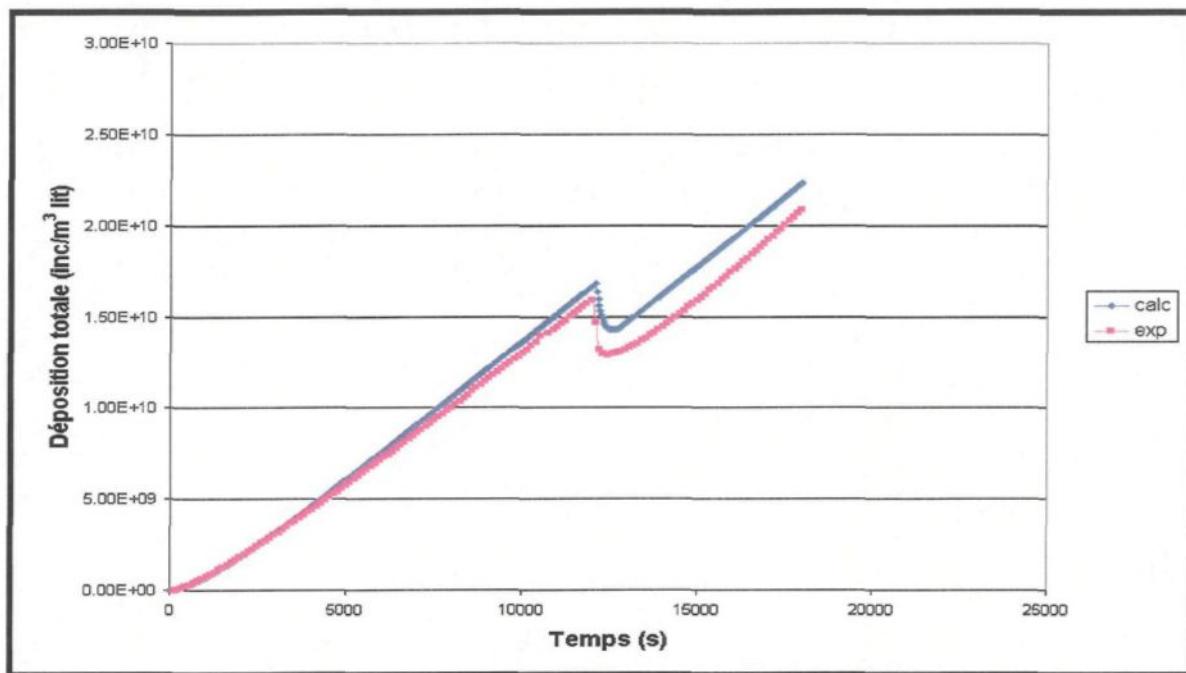


Figure 4.12 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 8-4po (3.6 mm/s)

Tableau 4.10 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 8 (3.6 mm/s)

| Série 8.1 | Écart entre le point minimal de chute de la déposition totale (%) |
|-----------|---|
| 1po | 13.6 |
| 2po | 23.5 |
| 3po | 0.8 |
| 4po | 10.4 |

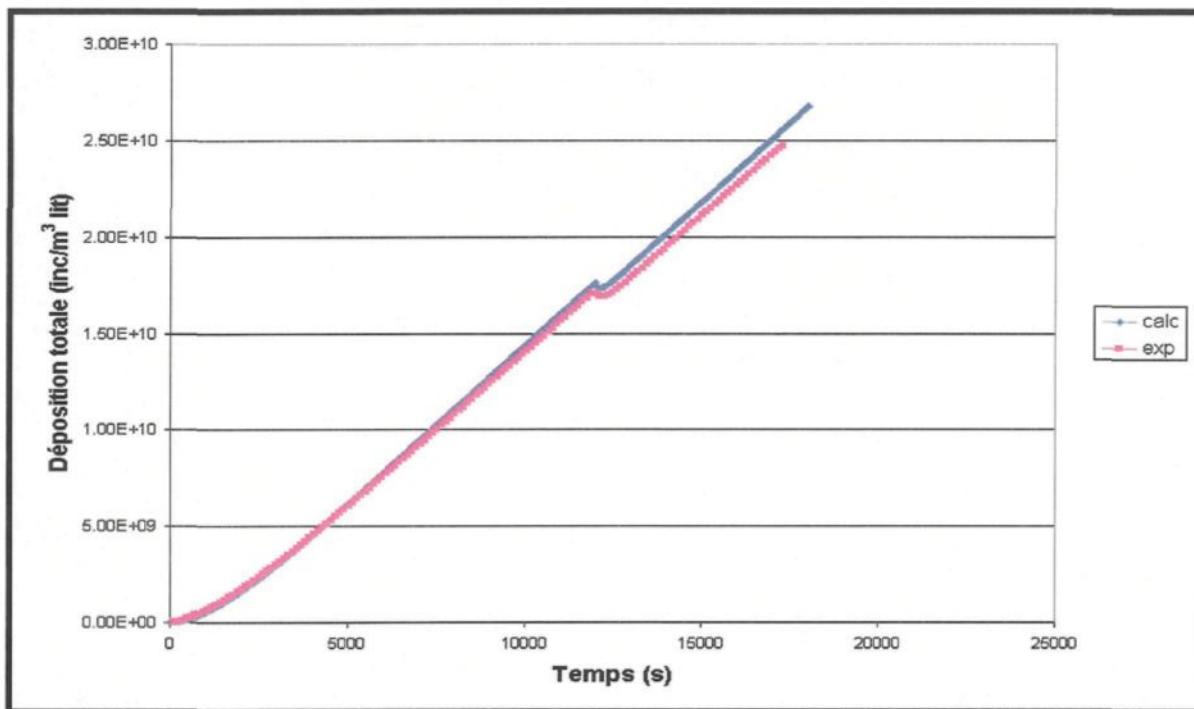


Figure 4.13 : Déposition totale. Comparaison modèle vs expérimental. Série 10-4po (175 000 inc/kg eau)

Tableau 4.11 : Écarts point min. de chute calc. vs exp. série 10 (175 000 inc/kg eau)

| Série 10.1 | Écart entre le point minimal de chute de la déposition totale (%) |
|------------|---|
| 1po | 40.7 |
| 2po | 2.0 |
| 3po | 8.6 |
| 4po | 2.7 |

Encore une fois ici, les résultats ont été choisis en fonction d'obtenir les plus petits écarts des points minimaux de chute pour le plus grand nombre de hauteurs expérimentées. Pour la série 2, seul le lit d'un pouce ne répond pas au critère de 30% et de peu. En effet, le lit d'un pouce présente un écart de 33.6% ce qui est près de la valeur maximale acceptable. La série 4 ne présente aucun écart plus élevé que la limite de 30%. Le lit présentant le plus grand écart est le lit de deux pouces avec un écart de 27.4%. C'est la série 6 qui présente les écarts les plus élevés. En effet, la série 6 offre un écart de 53.8% pour le lit d'un pouce, de 38.4% pour le lit de deux pouces, de 14.2% pour le lit de trois pouces et de 27.2% pour le lit de quatre pouces. Seuls les lits de trois et quatre pouces répondent au critère du 30% maximal. La non uniformité du lit explique encore ces résultats. Quant à la série 8, tous les résultats présentent des écarts de moins de 30% ce qui est satisfaisant. Finalement, la série 10 présente des écarts très faibles sauf dans le cas du lit d'un pouce qui dépasse la consigne de 10.7%. Dans tous les cas, les lits présentant des écarts plus prononcés ou les lits qui présentent des écarts de plus de 30% sont les lits de 1 et 2 pouces. Comme les résultats expérimentaux le démontrent, les lits de un et de deux pouces présentent plus de variabilité et d'instabilité dans les tendances qu'ils présentent due à la faible épaisseur d'alumine tabulaire. En effet, comme il a été discuté au chapitre 3 de cet ouvrage, les lits de un et deux pouces peuvent être sujets, entre autre, aux chemins préférentiels qui faussent grandement les données. Donc, puisque les résultats expérimentaux pour ces deux hauteurs de lit sont moins précis, la concordance avec le modèle est plus difficile à obtenir. De plus, si la concordance avec le départ de la courbe de déposition totale est faussée, c'est à dire, si le comportement de la déposition totale avant l'arrêt d'écoulement est faussé, le point

minimal de la chute de la courbe calculée et de la courbe expérimentale peut être grandement éloigné même si la quantité d'impuretés relâchées est la même. Le fait que la courbe de déposition totale expérimentale peut être sur ou sous évaluée dû à l'instabilité du montage expérimental peut expliquer ce phénomène.

À noter que les graphiques ne sont pas en nombre adimensionnés ce qui empêche la comparaison de l'influence des paramètres à l'étude comme il a été présenté au chapitre 3. L'objectif ici est plutôt de démontrer que le modèle concorde bien avec la réalité expérimentale. En effet, le modèle donne les mêmes tendances que ce qui est présenté expérimentalement puisque la concordance entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales est grandement satisfaisante.

4.7 Présentation des coefficients d'accumulation et de relâche

4.7.1 En écoulement continu

Voici donc les coefficients d'accumulation et de relâche obtenus grâce au modèle. Le modèle a permis en ajustant les constantes k_1 et k_2 de trouver les coefficients K_1 d'accumulation et K_2 de relâche en continu dont les valeurs adimensionnées seront introduites dans l'équation du bilan de masse présenté à l'équation 4.10. Notons que k_1 et k_2 sont constantes pour toutes les hauteurs de lit testées mais que K_1 et K_2 changent puisque A_p , ε et N varient selon les séries de tests effectuées, selon le paramètre à l'étude. À titre d'exemple, le graphique de l'évolution des coefficients K_1 et K_2 pour les conditions standards sont présentés aux figures 4.14 et 4.15.

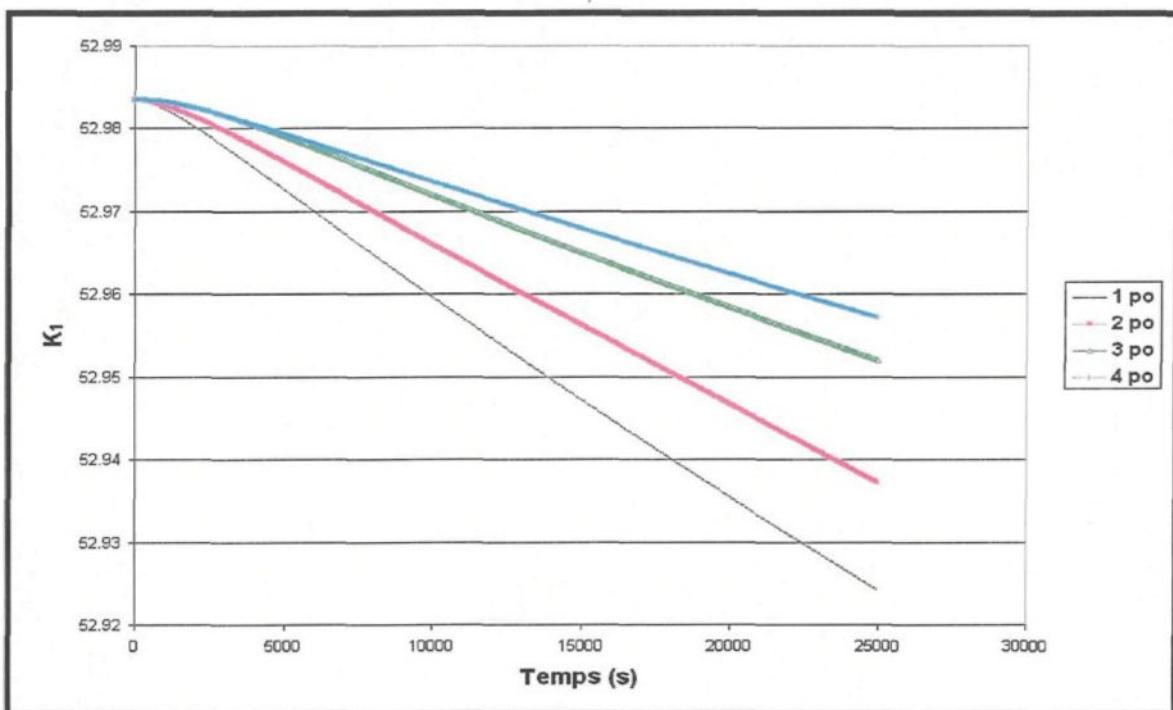


Figure 4.14 : Évolution du coefficient d'accumulation K_1 . Série 1 (cond. stand.)

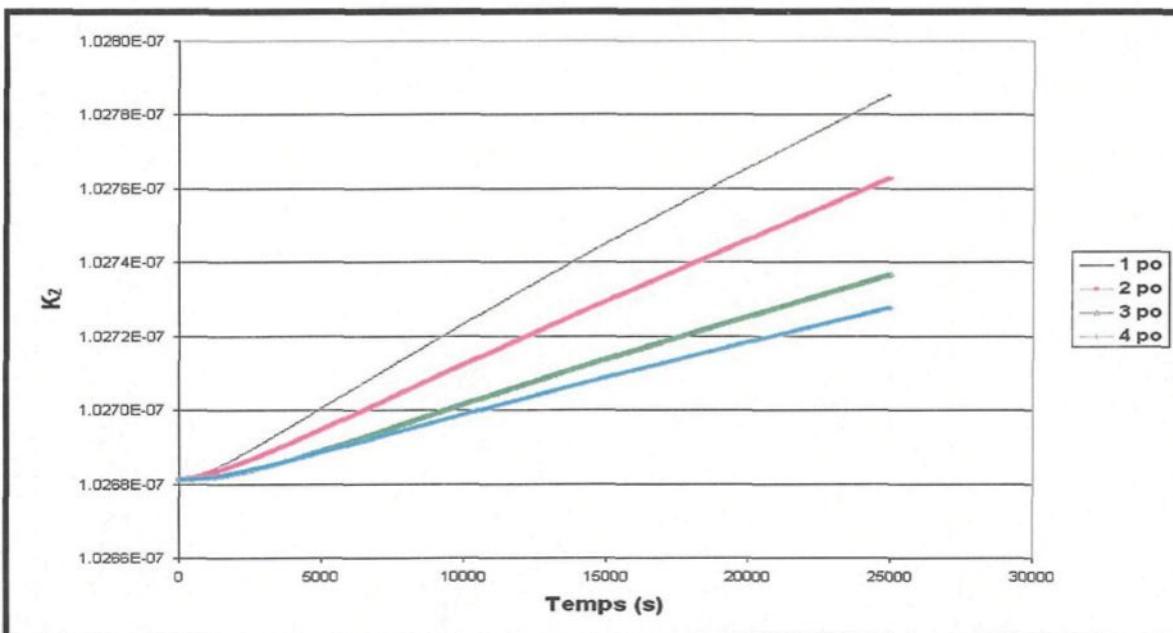


Figure 4.15 : Évolution du coefficient de relâche en continu K_2 . Série 1 (cond. stand.)

Pour cette série, et pour toutes les autres séries effectuées en écoulement continu, et, même si le changement est minime, il est possible de remarquer que le coefficient d'accumulation est plus élevé lorsque le lit du filtre est plus haut. Le contraire aurait été étonnant. Quant au comportement du coefficient de relâche, il est plus élevé lorsque le lit est moins haut. Encore une fois ici, le comportement était prévisible. Fait intéressant à noter, le changement du coefficient entre chaque hauteur de lit est très petit mais affecte grandement les conditions de déposition. Autre fait intéressant à noter, le coefficient d'accumulation diminue au fil du temps alors que le coefficient de relâche, lui, augmente puisque les inclusions qui se détachent des lits plus courts ne sont pas capturées à nouveau par les couches inférieures. Les expressions mathématiques représentant les coefficients K_1 et K_2 (équations 4.11 et 4.22) aident à comprendre ces tendances. En effet, le coefficient K_1 ne peut évoluer qu'à la baisse puisque l'augmentation de l'aire de la particule est contrecarrée par la diminution de la porosité. Le coefficient K_2 , quant à lui, augmente puisque que le seul terme à évoluer au cours du processus est l'aire de la particule filtrante qui augmente dans le temps avec la déposition. Le comportement des deux coefficients laisse croire que l'accumulation laisse place à la relâche dans la progression du processus de filtration. La baisse de l'accumulation et l'augmentation de la relâche en continu dans le temps sont des phénomènes dépendants et complémentaires. Voici le tableau résumé des coefficients d'accumulation et de relâche en continu obtenus (tableau 4.12). À noter que les variations des coefficients entre les hauteurs de lit se situent au niveau des centièmes et même plus. Les valeurs présentées ont été arrondies et sont donc les mêmes pour les quatre hauteurs de filtre testées. Le tableau 4.12 présente les coefficients initiaux obtenus par simulations.

Tableau 4.12 : Coefficients initiaux d'accumulation (K_1) et de relâche en continu (K_2)

| Série | K_1 initial | K_2 initial |
|-------------------------|------------------|------------------|
| 1 (cond. stand.) | 53 | 1 E-07 |
| 3 (3-6 mm) | 23 | 5 E-08 |
| 5 (6-12 mm) | 11 | 2 E-08 |
| 7 (3.6 mm/s) | 53 | 1 E-07 |
| 9 (175 000 inc/kg eau) | 66 | 1 E-07 |
| 11 (700 000 inc/kg eau) | 66 | 1 E-07 |

Par les résultats obtenus, il est possible de conclure que le modèle est fidèle aux observations expérimentales. En effet, le modèle démontre bien que pour les séries effectuées avec de plus grosses particules filtrantes (séries 3 et 5), l'accumulation est de moins en moins prononcée au fur et à mesure que le grain filtrant est élargi. De la même façon, plus le grain du filtre est grossier, plus la relâche en continu s'estompe. Grâce aux équations 4.11 et 4.22, il est possible de reconnaître que la diminution du nombre de grains filtrants par unité de volume lorsque la taille de ce dernier augmente est le paramètre le plus influent de l'expression des coefficients. Enfin, on peut conclure que pour les séries 1, 3 et 5, la relâche est dépendante de l'accumulation. Plus l'accumulation est prononcée, plus la relâche l'est aussi. On ne note toutefois pas de diminution prononcée de l'accumulation et on ne note également pas d'augmentation de la relâche en continu (par rapport à la série 1) pour la série 7, série où la vitesse d'écoulement a été augmentée. Notons que ce comportement était prévisible. En effet, si l'on se réfère au tableau 3.10 du chapitre

précédent, on remarque que le taux de déposition n'a pas été trop affecté par cette augmentation de vitesse. Le modèle est donc cohérent.

Quant à la série où la concentration a été augmentée d'un facteur de 1.75, (série 9), le coefficient d'accumulation augmente de 24%. Cette légère augmentation peut s'expliquer par le fait que l'utilisation d'une concentration plus élevée a permis au terme de l'aire de la particule (A_p) de jouer un plus grand rôle dans l'expression mathématique de K_1 . Même si le coefficient K_1 augmente peu, ce coefficient est associé à la valeur de la concentration et c'est l'union de ces deux valeurs qui exprime l'importance de l'accumulation et par le fait même de la déposition totale. En effet, les résultats expérimentaux synthétisés au tableau 3.10 démontrent que le taux d'accumulation est plus prononcé pour une concentration d'entrée du système plus élevée. Notons que le coefficient de relâche ne varie pas vraiment de celui obtenu aux conditions standards. Ceci est probablement explicable par le fait que plus la concentration augmente, plus elle maximise le pouvoir de rétention du réseau poreux du filtre, ce qui rend la relâche moins probable. Les mêmes conclusions peuvent être tirées de la série 11, série effectuée à 700 000 inc/kg eau.

4.7.2 En écoulement interrompu

Voici maintenant pour l'écoulement interrompu la présentation des coefficients K_1 d'accumulation et la fonction de distribution des coefficients K_3 de relâche. Le coefficient K_1 a été soumis au même facteur d'ajustement k_1 qu'en écoulement continu puisque les tests ont été effectués aux mêmes conditions d'opération avant l'arrêt de la circulation de l'écoulement. À titre d'exemple, le comportement du coefficient K_1 sera présenté à la figure 4.16 pour les conditions standards et les valeurs initiales pour chaque série seront résumées au tableau 4.13. Également à titre d'exemple, le comportement de la fonction de coefficients K_3 sera présenté à la figure 4.17 pour les mêmes conditions. Le pourcentage du volume total d'inclusions relâchées (V_r), la plage de temps (t_r) et l'exposant « α » (voir équation 4.23 et voir annexe 7) seront également résumés dans le tableau 4.13. Voici donc les figures 4.16 et 4.17.

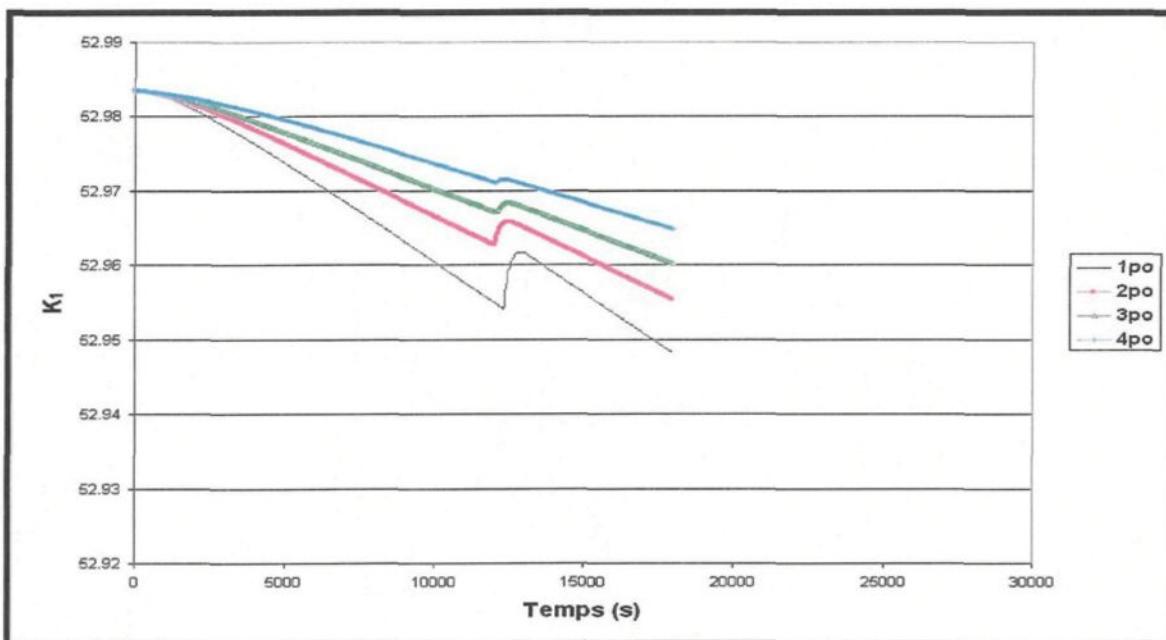


Figure 4.16 : Évolution du coefficient d'accumulation K_1 . Série 2 (cond. stand.)

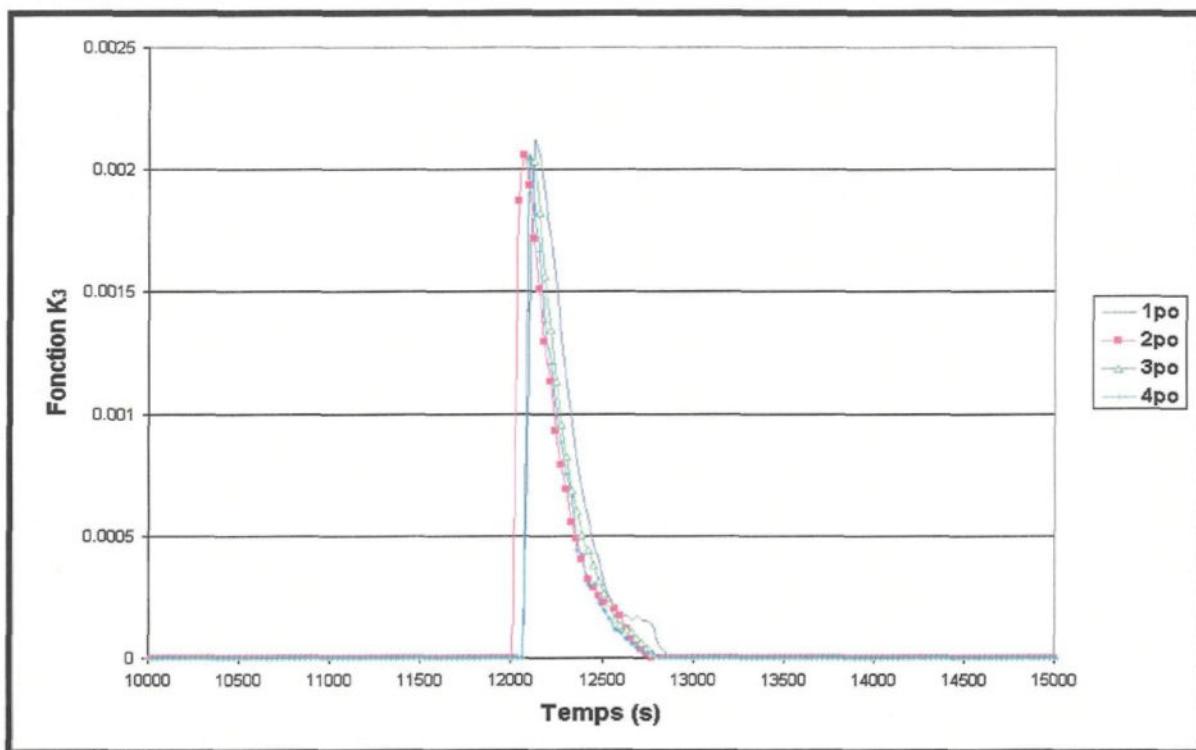


Figure 4.17 : Évolution de la fonction des coefficients de relâche en interrompu K_3 . Série 2 (cond. stand.)

Pour ces conditions et pour toutes les autres conditions testées, le comportement de l'accumulation est semblable. Il est possible de remarquer qu'une légère différence entre l'écoulement continu et l'écoulement interrompu existe. En effet, lorsque la circulation est arrêtée puis repartie, le coefficient K_1 d'accumulation augmente le temps que le nuage d'inclusions relâchées soit disparu. Sinon, l'évolution est la même et on remarque, tout comme en écoulement continu que le coefficient est plus élevé pour les filtres plus hauts. La fonction de distribution des coefficients de relâche K_3 , quant à elle, correspond bien à une courbe normale de distribution. Peu de conclusions peuvent être relevées de cette figure sinon qu'il était prévisible d'obtenir cette forme de fonction.

Voici maintenant le tableau résumé des coefficients K_1 et des paramètres permettant d'obtenir la fonction de coefficients K_3

Tableau 4.13 : Coefficient initial d'accumulation (K_1) et paramètres de la fonction de coefficients de relâche en interrompu (K_3)

| Série | K_1 initial | Paramètres ajustables de K_3 |
|-------|------------------|---|
| 2.1 | 53 | $V_r = 90\%, t_r = 1000s, \alpha = 0.2$ |
| 4.1 | 23 | $V_r = 90\%, t_r = 1000s, \alpha = 0.2$ |
| 6.1 | 11 | $V_r = 90\%, t_r = 1000s, \alpha = 0.2$ |
| 8.1 | 53 | $V_r = 90\%, t_r = 1000s, \alpha = 0.2$ |
| 10.1 | 66 | $V_r = 90\%, t_r = 1000s, \alpha = 0.2$ |

Globalement, les valeurs de la constante K_1 pour chaque série restent les mêmes puisque les conditions d'opération sont les mêmes que les séries correspondantes effectuées en écoulement continu. Quant aux paramètres ajustables de la fonction de coefficients K_3 , ils sont les mêmes pour toutes les séries de tests. Rappelons encore une fois que l'objectif est d'exprimer globalement le phénomène de relâche qui nous intéresse. Évidemment, en utilisant les mêmes paramètres qui servent à décrire l'allure de la courbe pour chaque série, on obtient des courbes de distribution semblables, peu importe les conditions d'opération des tests, qui donnent des courbes de déposition totale représentatives. En fait, puisque le modèle représente bien le phénomène d'accumulation des particules, les courbes de distribution du pourcentage d'inclusions relâchées ne peuvent qu'être réalistes. En effet,

comme il a été conclu précédemment, la relâche, qu'elle soit en continu ou en interrompu est dépendante de la quantité d'impuretés accumulées préalablement dans le filtre. Ceci est très bien démontré par la figure 4.17 où il est possible de voir que, lors du deuxième départ de la circulation de l'eau dans le système expérimental, l'augmentation de la constante d'accumulation est plus prononcée pour les lits plus courts puisque la relâche est plus élevée dans ces mêmes lits.

4.8 Correspondance du terme d'accumulation

Fait intéressant à noter, la terme d'accumulation du modèle proposé dans cet ouvrage peut être comparé au terme d'accumulation proposé par Tien (équation 1.14). En effet, la valeur initiale du coefficient K_1 équivaut au produit du coefficient de filtration, de la vitesse superficielle, de la densité de l'eau et de la concentration des inclusions par kilogramme d'eau. C'est à dire :

$$K_1 C = \lambda u_s \rho_l C \quad (4.28)$$

Ainsi,

$$\lambda = \frac{K_1}{u_s \rho_l} \quad (4.29)$$

où K_1 est la valeur initiale obtenue par simulation présentée aux tableaux 4.12 et 4.13.

La comparaison entre la valeur du coefficient de filtration déterminée à partir du modèle (équation 4.28) et la valeur du coefficient de filtration théorique déterminée à l'aide des équations 1.11 et 1.12 peut être effectuée. Voici les résultats de cette comparaison au tableau 4.14.

Tableau 4.14 : Comparaison λ calculé vs λ théorique

| Série | λ (à partir du modèle) | λ théorique | % écart |
|---------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------|
| 1 et 2 (cond. stand.) | 29.4 | 24.2 | 21.4 |
| 3 et 4 (3-6 mm) | 12.8 | 13.5 | 5.2 |
| 5 et 6 (6-12 mm) | 6.1 | 7.4 | 14.9 |
| 7 et 8 (3.6 mm/s) | 14.7 | 12.8 | 14.8 |
| 9 et 10 (175 000 inc/kg eau) | 36.7 | 24.2 | 51.6 |
| 11 (700 000 inc/kg eau) | 36.7 | 24.2 | 51.6 |

À partir de ces résultats, il est possible de conclure que le modèle et la théorie correspondent de façon très satisfaisante. Le plus grand écart étant de 51.6% pour les séries effectuées à des concentrations d'entrée plus élevées. Globalement, il est possible d'affirmer que les écarts entre l'expression théorique et le modèle sont très satisfaisants et permettent de conclure que le modèle est crédible. Ainsi, dans un processus continu ou interrompu, il est possible de prédire l'évolution du coefficient de filtration en fonction du temps. Il est possible de remarquer que le coefficient de filtration décroît lentement dans le temps. Il est possible de conclure alors que le filtre perd sa capacité de rétention peu à peu dans le temps. Voici un exemple pour le processus continu, pour les conditions standards (voir figure 4.18).

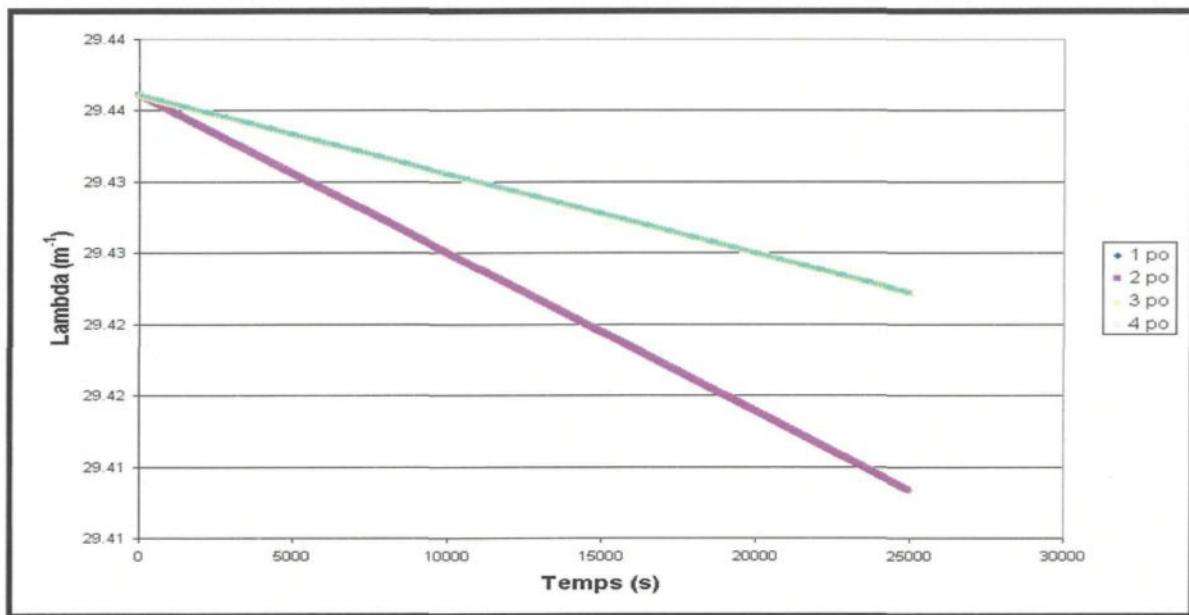


Figure 4.18 : Évolution du coefficient de filtration. Série 1 (cond. stand.)

4.9 Particularités du modèle

En cette fin de chapitre, il serait intéressant de présenter ce que le modèle peut offrir comme informations supplémentaires. En effet, le modèle permet d'exprimer l'évolution de la concentration, l'évolution de la porosité et l'évolution de la déposition en fonction du temps et de la hauteur du filtre. Une dernière analyse sera donc produite pour tous les paramètres étudiés. Les résultats qui sont présentés sont pour le lit de 4 pouces. Voici les graphiques démontrant le comportement de la concentration, de la porosité et de la déposition totale pour chaque hauteur de lit considérée en écoulement continu et en écoulement interrompu. (figure 4.19 à 4.50)

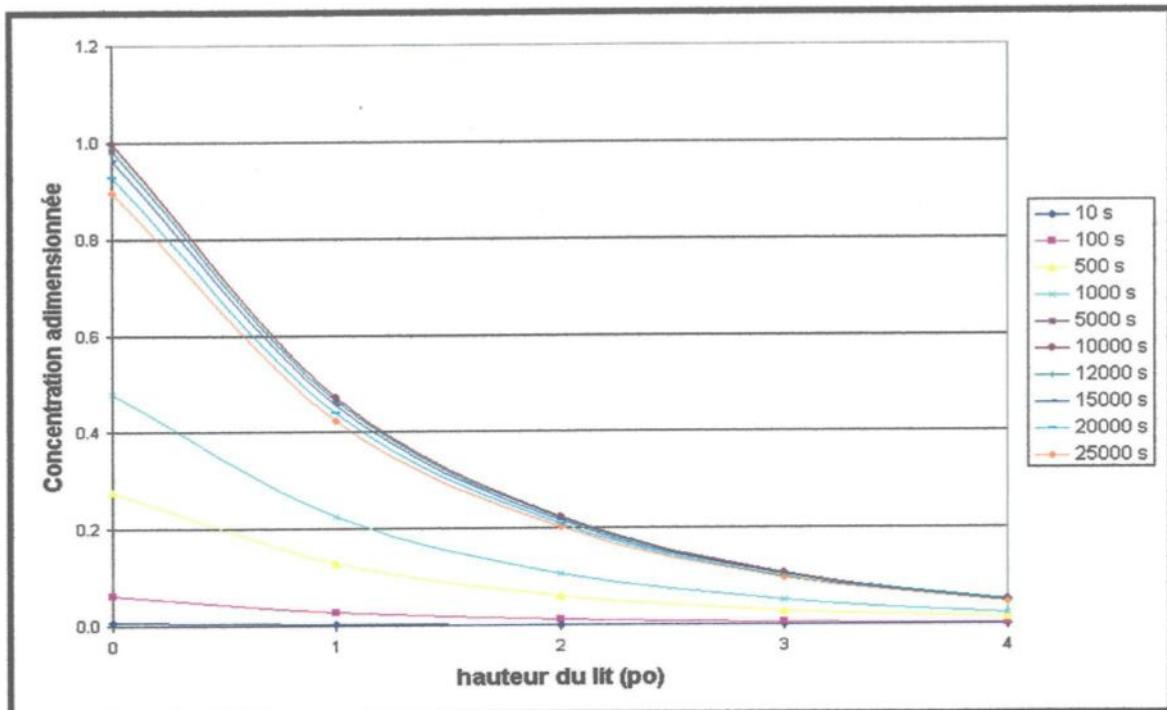


Figure 4.19 : Évolution de la concentration- écoulement continu -Série 1 (cond. stand.)

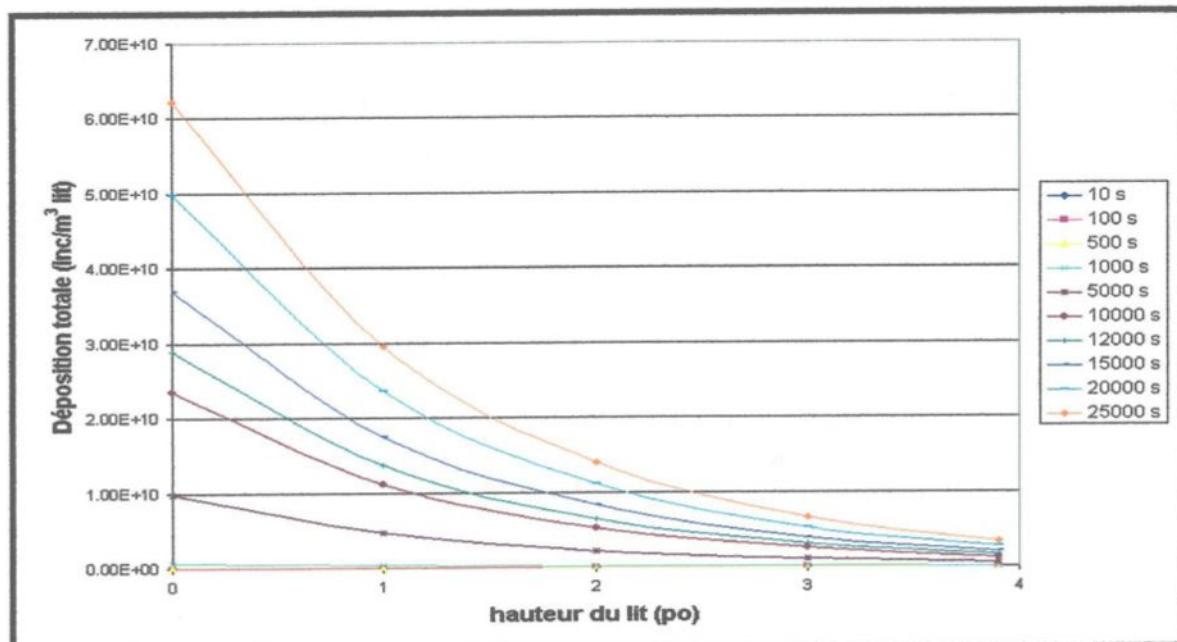


Figure 4.20 : Évolution de la déposition totale- écoulement continu -Série 1 (cond. stand.)

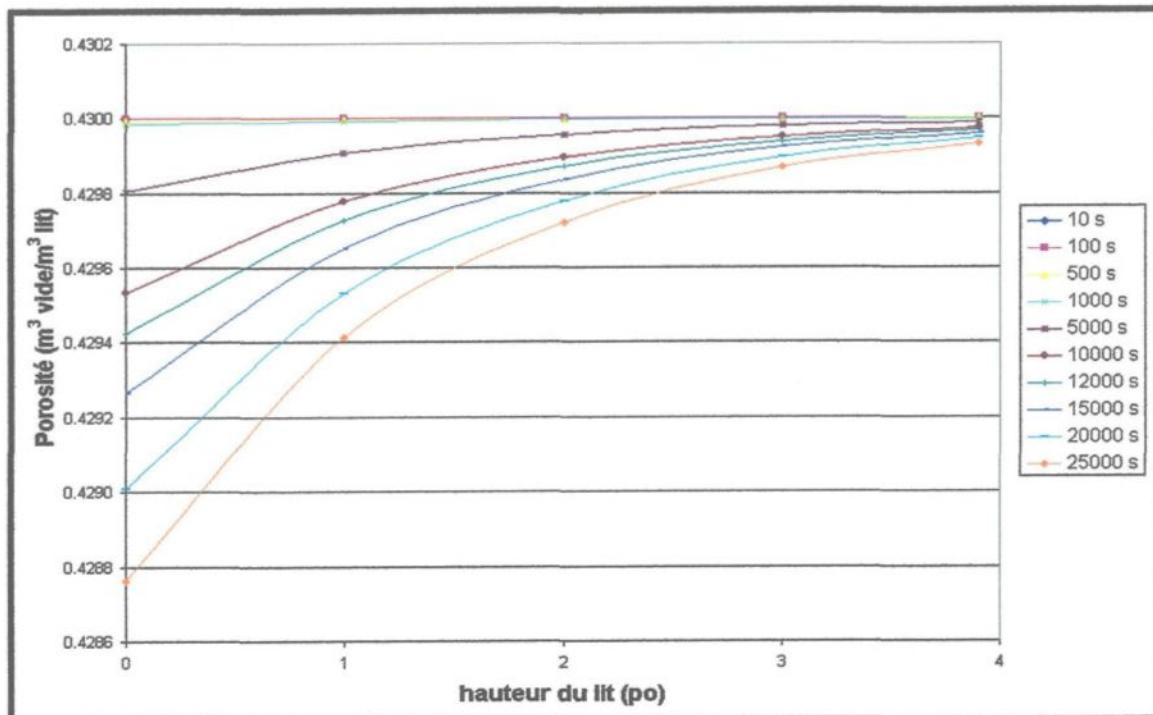


Figure 4.21 : Évolution de la porosité - écoulement continu -Série 1 (cond. stand.)

Il est donc possible de remarquer pour la série 1 que la concentration des particules dans l'eau diminue au fur et à mesure que la solution pénètre plus profondément dans le filtre. De manière évidente, la solution s'épure de plus en plus, à chaque niveau. Il semble que ce soit les niveaux supérieurs du filtre qui retiennent la majeure partie des inclusions. On remarque une légère baisse de la concentration dans le temps ce qui a également été observé en laboratoire. Par le fait même, le nombre d'inclusions déposées est plus élevé dans les couches supérieures du filtre et en fonction du temps de filtration, ce qui avait été remarqué lors de l'analyse des résultats expérimentaux. Finalement, la porosité en écoulement continu diminue avec le temps puisque la déposition des inclusions augmente ce qui fait rétrécir la taille initiale des pores.

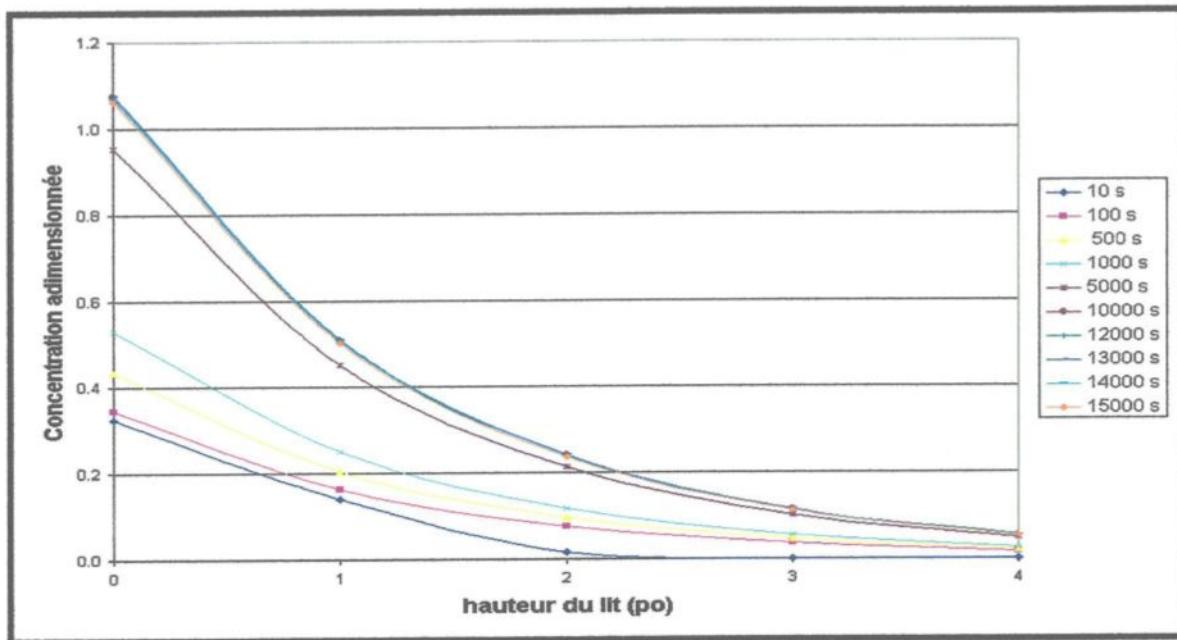


Figure 4.22 : Évolution de la concentration- écoulement interrompu -Série 2 (cond. stand.)

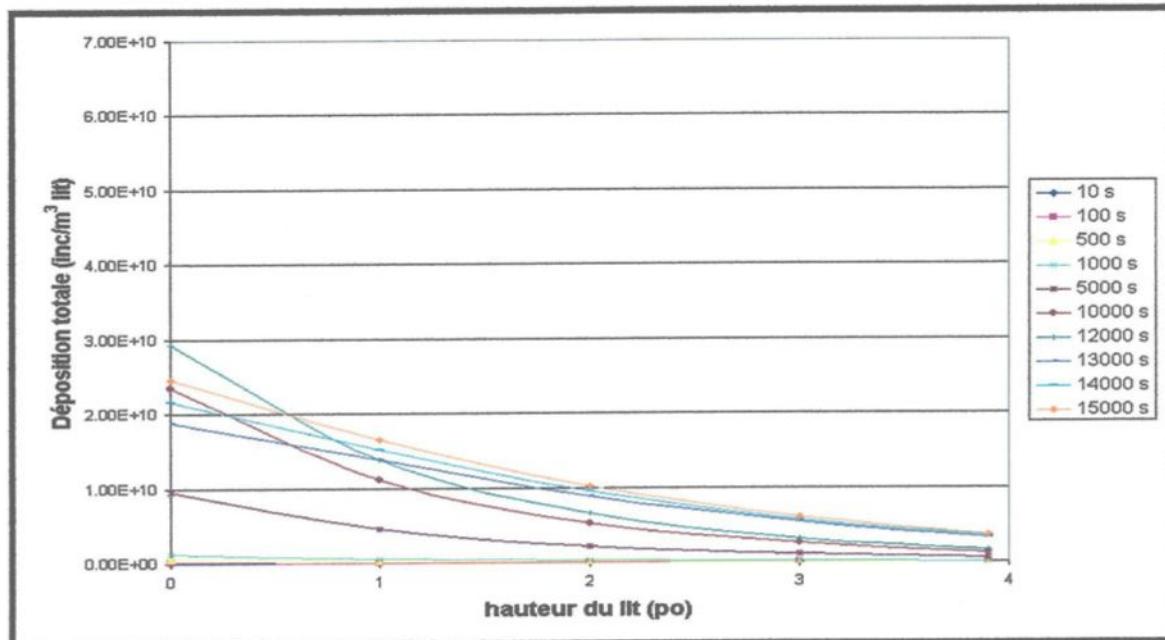


Figure 4.23 : Évolution de la déposition totale -écoulement interrompu- Série 2 (cond. stand.)

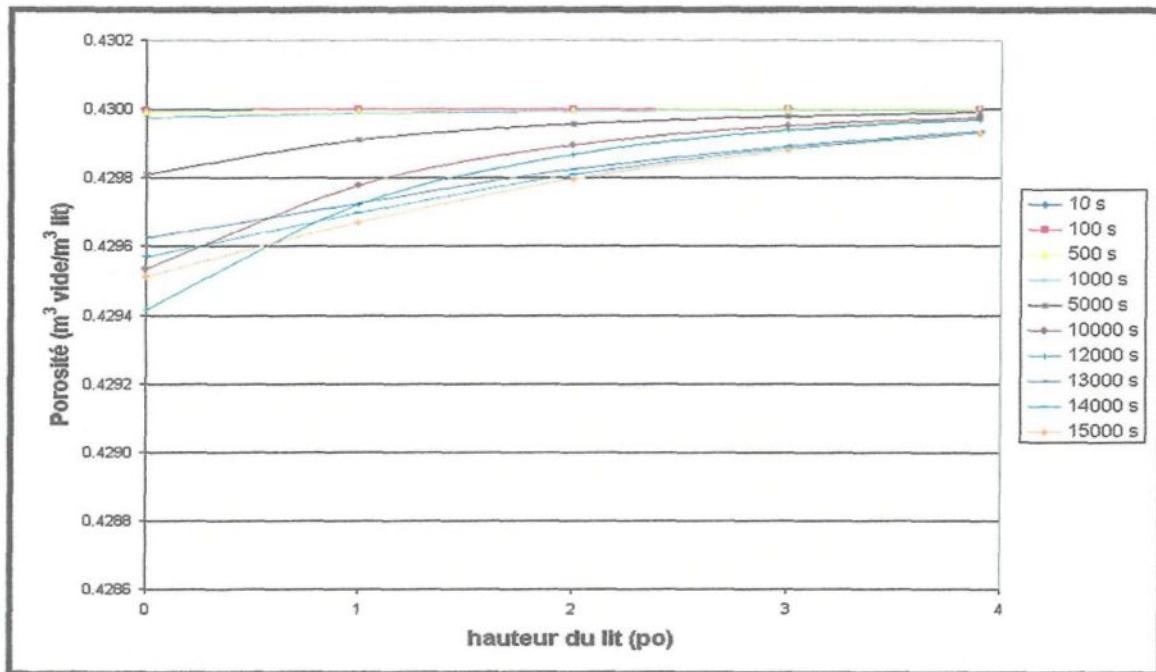


Figure 4.24 : Évolution de la porosité- écoulement interrompu -Série 2 (cond. stand.)

Quant à l'étude effectuée aux conditions standards, en écoulement interrompu (série 2), elle démontre que l'évolution de la concentration des inclusions diminue en fonction de la hauteur du filtre tel qu'il est attendu. Aussi, le comportement de la déposition démontre bien l'existence de la relâche pour ce type d'écoulement. En effet, il est possible de remarquer que les courbes de déposition suivant celle de 12000 secondes, moment où l'arrêt d'écoulement est provoqué, sont à un niveau de déposition plus bas que cette dernière. Ce phénomène est bien visible pour le premier pouce du filtre, ce qui confirme que la relâche est un phénomène complémentaire de l'accumulation puisque c'est dans le premier pouce que les inclusions sont capturées en plus grand nombre. En effet, plus l'accumulation est importante, plus il y a risque de relâche. De la même façon, la porosité réagit en fonction du

comportement de la déposition. Ainsi, pour des niveaux de déposition plus élevés, la porosité sera plus petite et vice versa.

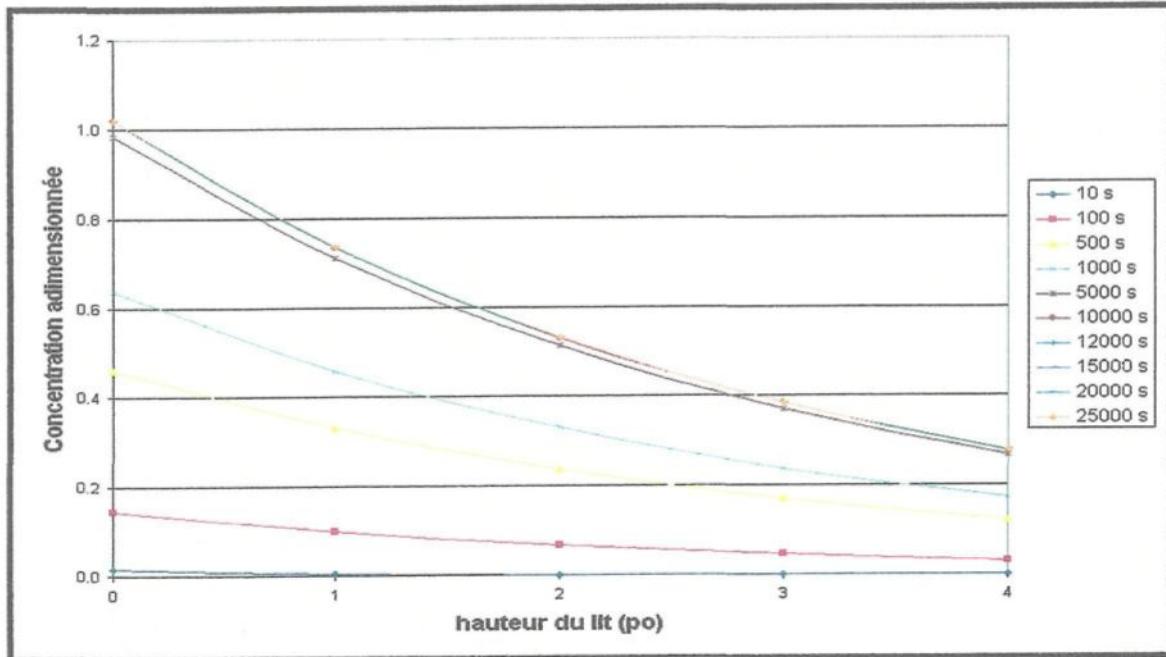


Figure 4.25 : Évolution de la concentration- écoulement continu -Série 3 (3-6 mm)

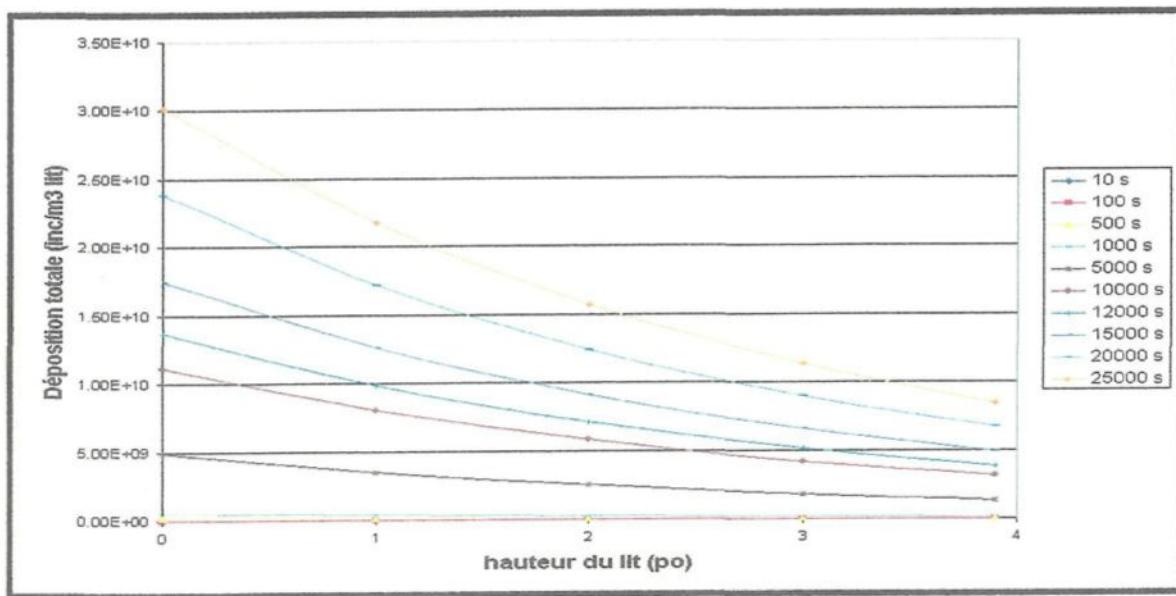


Figure 4.26 : Évolution de la déposition totale - écoulement continu -Série 3 (3-6 mm)

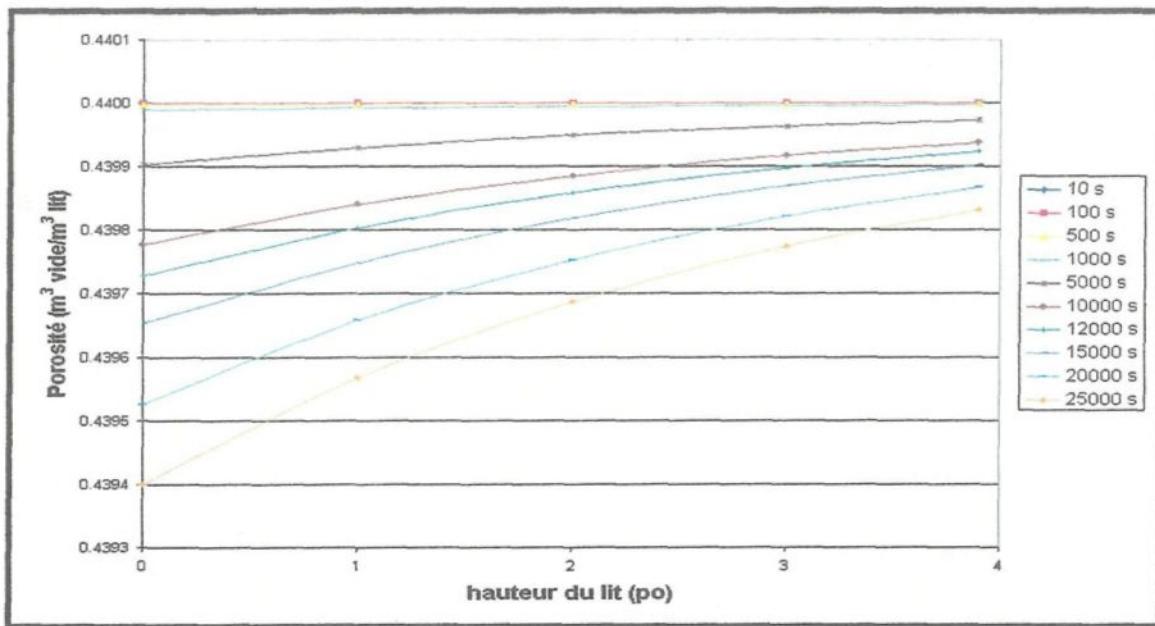


Figure 4.27 : Évolution de la porosité- écoulement continu-Série 3 (3-6 mm)

Pour ce qui est de la série 3, il est possible de remarquer que, de la même façon que les deux premières séries, la concentration des inclusions dans le fluide diminue avec l'augmentation de la profondeur du filtre. Il est possible de remarquer également que la concentration d'inclusions dans l'eau tend à être plus élevée qu'aux conditions standards puisque les grains filtrants retiennent moins bien les impuretés. Quant à la déposition, elle augmente avec le temps et est plus prononcée pour les couches supérieures mais est inférieure à celle obtenue aux conditions standards (série 1), comme il a été observé dans les analyses des résultats expérimentaux. La porosité, elle, se comporte tel que prévu.

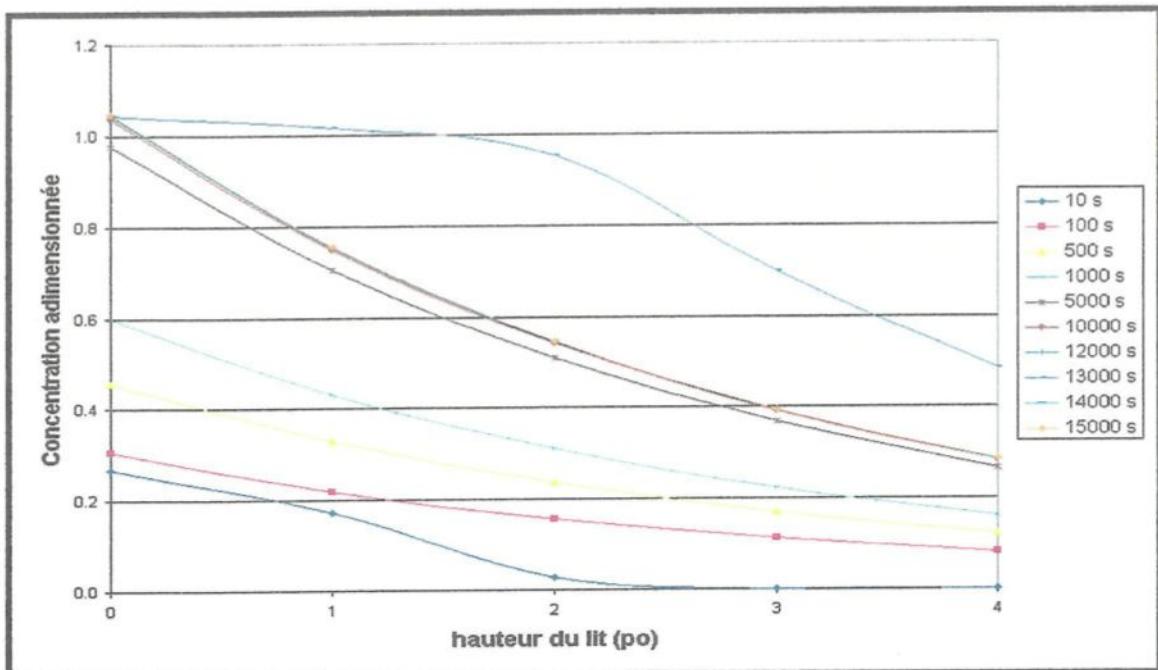


Figure 4.28 : Évolution de la concentration- écoulement interrompu -Série 4 (3-6 mm)

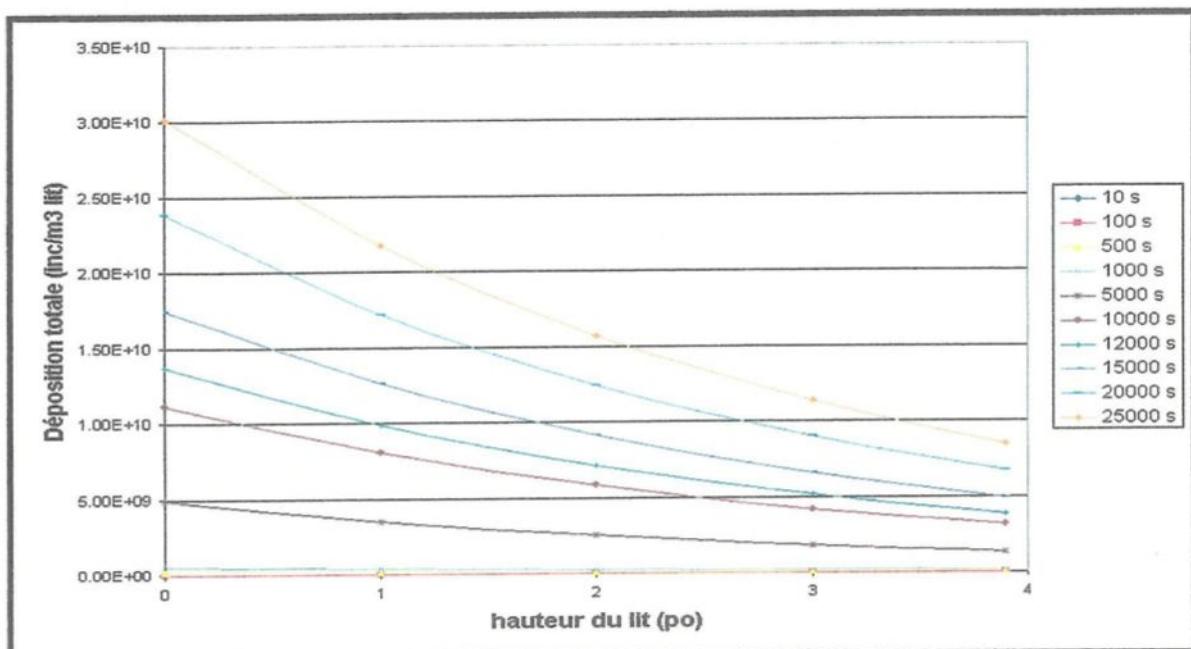


Figure 4.29 : Évolution de la déposition totale- écoulement interrompu -Série 4 (3-6 mm)

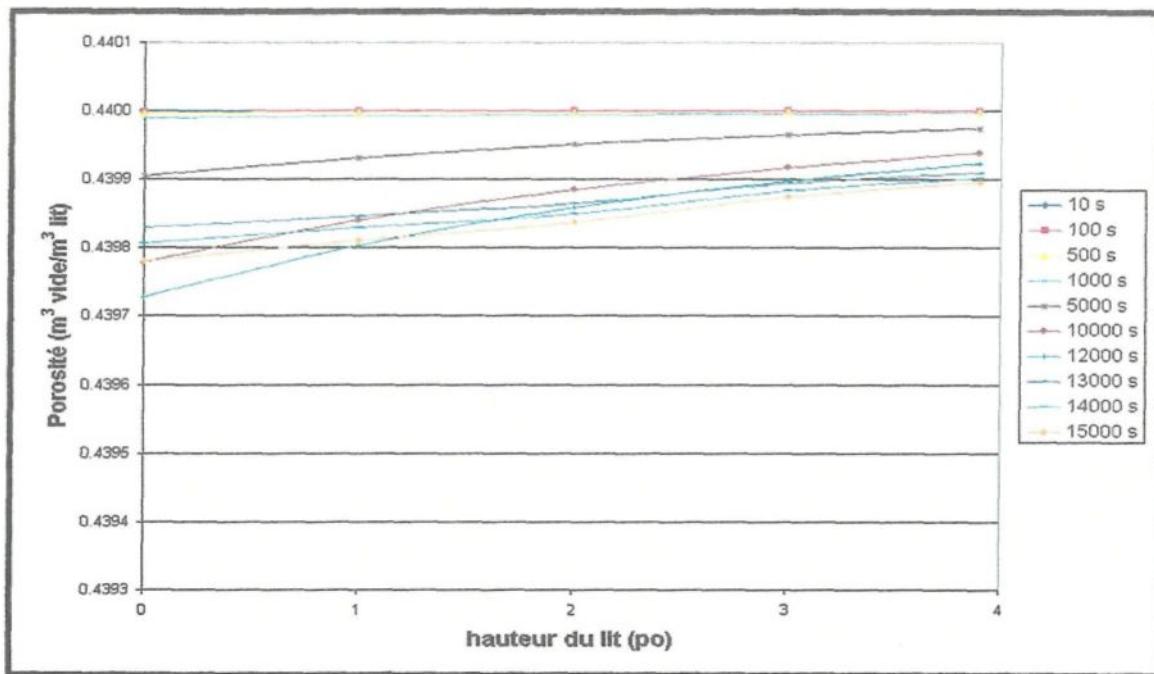


Figure 4.30 : Évolution de la porosité- écoulement interrompu -Série 4 (3-6 mm)

Le comportement de la concentration en écoulement interrompu évolue de la même façon que les cas précédents. En effet, la concentration diminue en fonction de la hauteur du lit et augmente en fonction du temps. Évidemment la concentration est un peu plus élevée à chaque temps étudié pour les mêmes raisons que celles expliquées dans l'analyse de la série 3. Cependant, il est possible de remarquer qu'à 13000 secondes, la concentration est plus élevée qu'à tous les autres moments ce qui démontre clairement qu'une quantité importante d'inclusions est relâchée à nouveau dans le fluide. (À noter que cette hausse de concentration vers 12000 – 13000 secondes est bien visible pour cette série et pour la série 11 (voir ci-dessous). Les autres essais en écoulement interrompu présentent plutôt des

concentrations à 12000 – 13000 secondes aussi élevées que celle à 15000 secondes mais ne dépassent jamais cette dernière ce qui démontre tout de même que la relâche des inclusions crée une hausse momentanée de la concentration des inclusions dans le fluide.) Quant à la déposition, elle se comporte sensiblement comme les simulations effectuées aux conditions standards, en effet, on remarque qu'après 12000 secondes, la déposition diminue et augmente à nouveau graduellement par la suite. Tout comme aux conditions standards, c'est essentiellement le premier pouce du filtre qui subit le phénomène de relâche. Comme pour la série 3, la déposition est globalement moins importante que celle obtenue aux conditions standards puisque les grains filtrants retiennent moins les inclusions. La porosité, est, quant à elle fidèle, au comportement de la déposition.

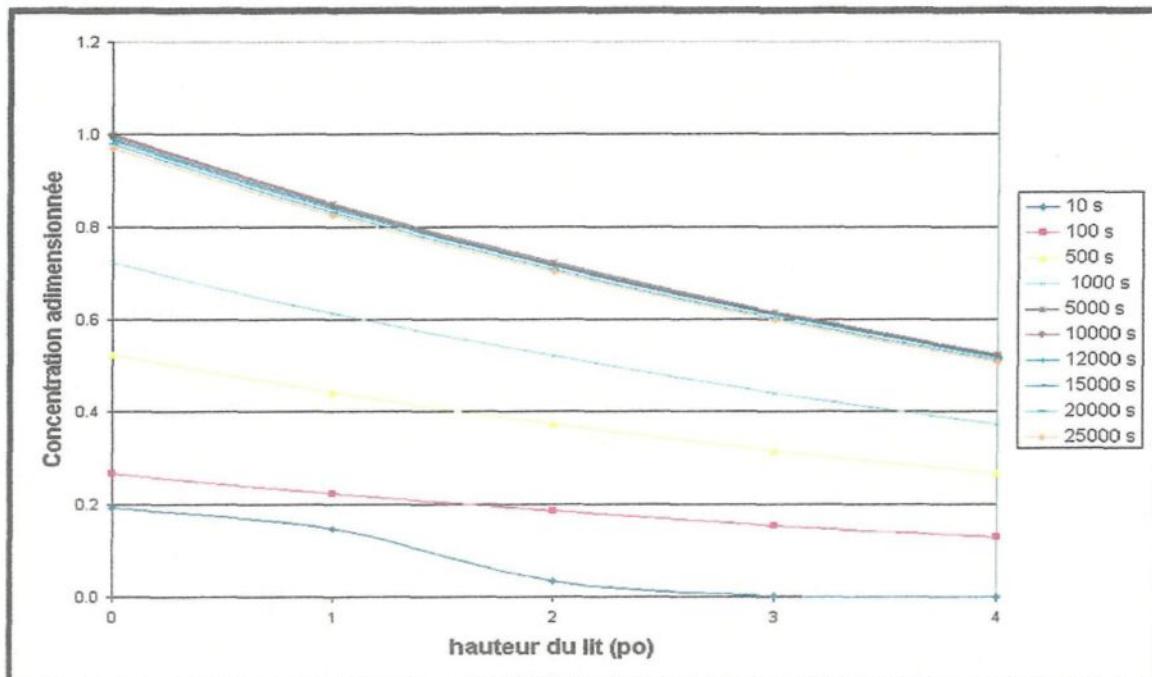


Figure 4.31 : Évolution de la concentration- écoulement continu -Série 5 (6-12 mm)

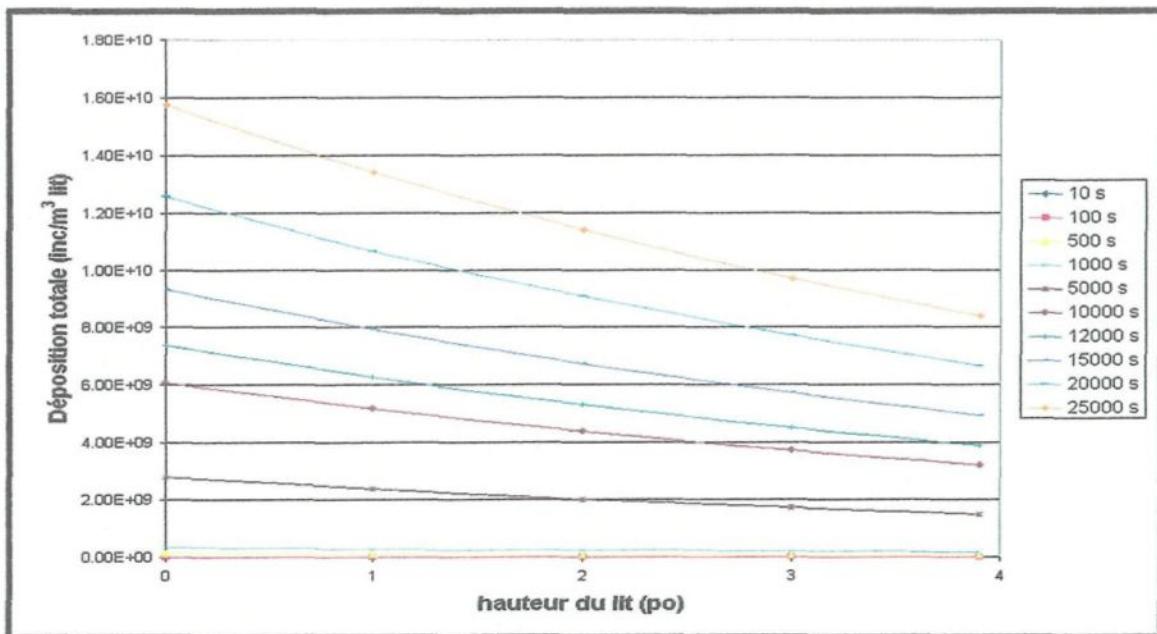


Figure 4.32 : Évolution de la déposition totale- écoulement continu -Série 5 (6-12 mm)

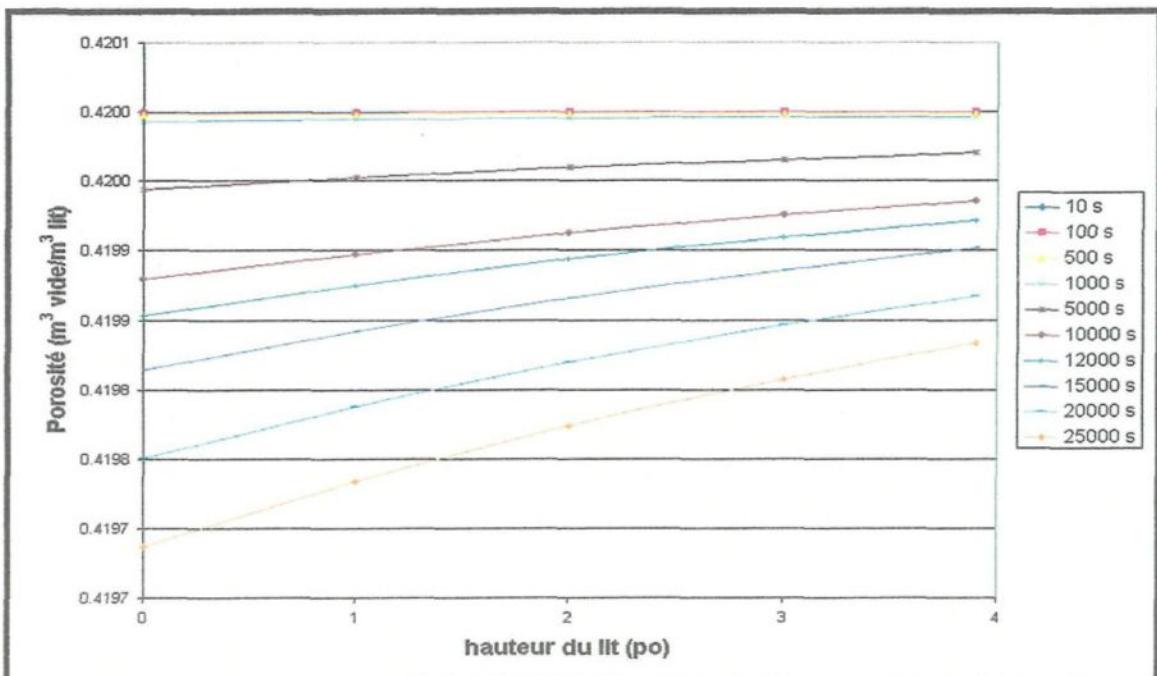


Figure 4.33 : Évolution de la porosité- écoulement continu -Série 5 (6-12 mm)

Pour la série 5, série où les grains filtrants de taille 6-12 mm sont utilisés, il est possible de remarquer les mêmes tendances que celles observées précédemment pour ce qui est de la concentration qui diminue en fonction de l'augmentation du filtre mais qui est toutefois, à certains niveaux, plus élevée qu'aux conditions standards vu la capacité de rétention moins grande de ce système. Quant à la déposition, elle augmente en fonction du temps et est plus prononcée pour la première couche du lit mais est moins importante que la série 1 et la série 3 qui utilisent des grains filtrants plus efficaces. Quant à la porosité, elle suit également la bonne tendance.

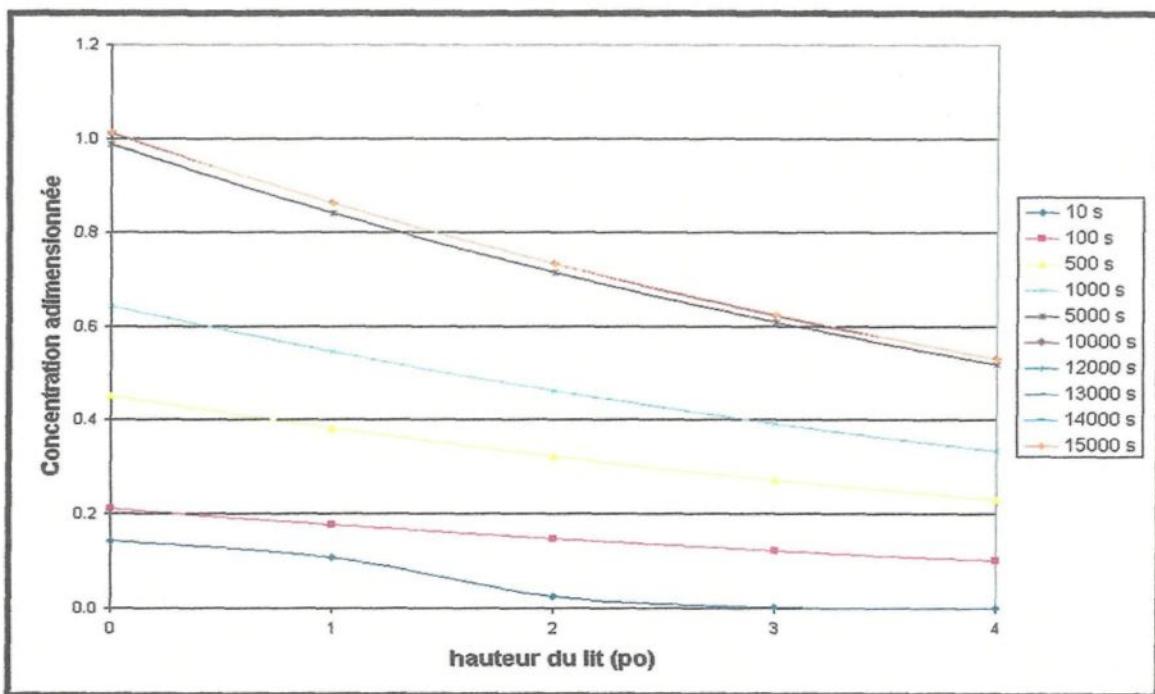


Figure 4.34 : Évolution de la concentration- écoulement interrompu -Série 6 (6-12 mm)

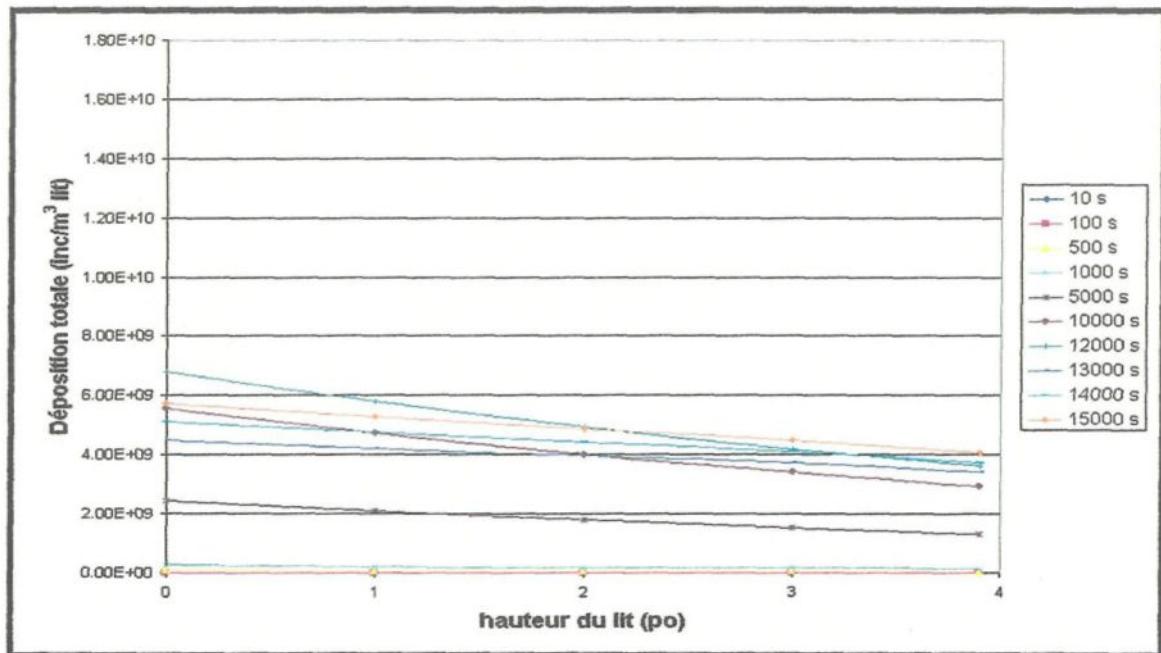


Figure 4.35 : Évolution de la déposition totale- écoulement interrompu -Série 6 (6-12 mm)

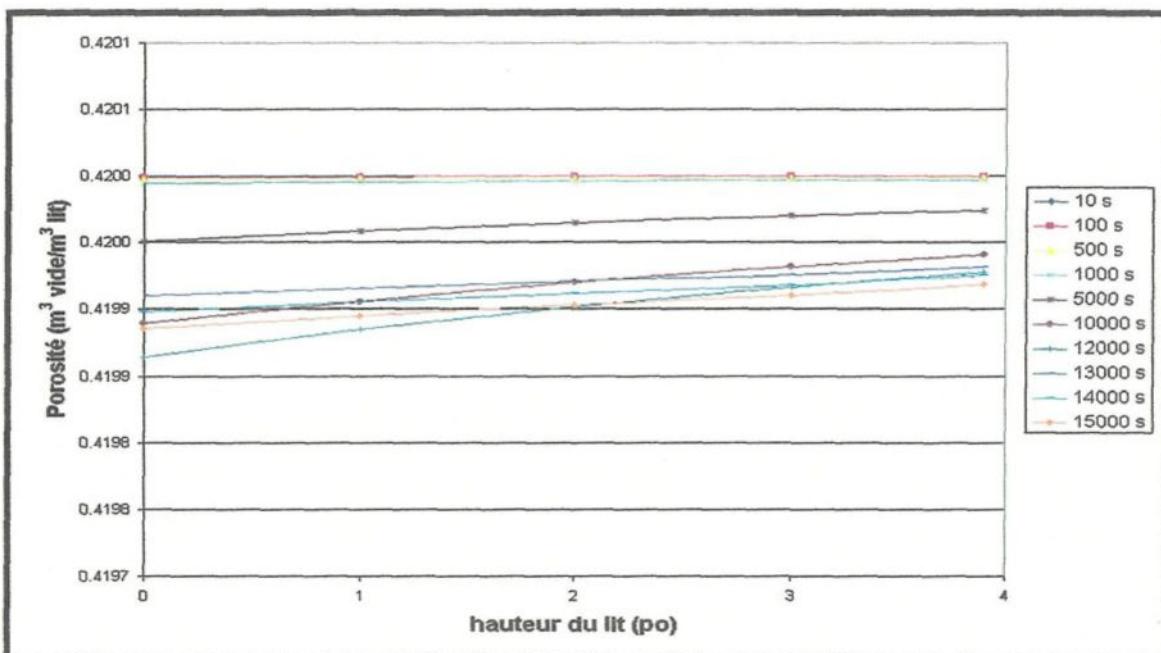


Figure 4.36 : Évolution de la porosité- écoulement interrompu -Série 6 (6-12 mm)

L'étude de la série 6, effectuée en écoulement interrompu, démontre les mêmes tendances que les autres études effectuées pour ce type d'écoulement quant à la concentration, la déposition et la porosité. Encore une fois, on remarque une baisse de la déposition pour le premier pouce après l'arrêt de l'écoulement à 12000 secondes.

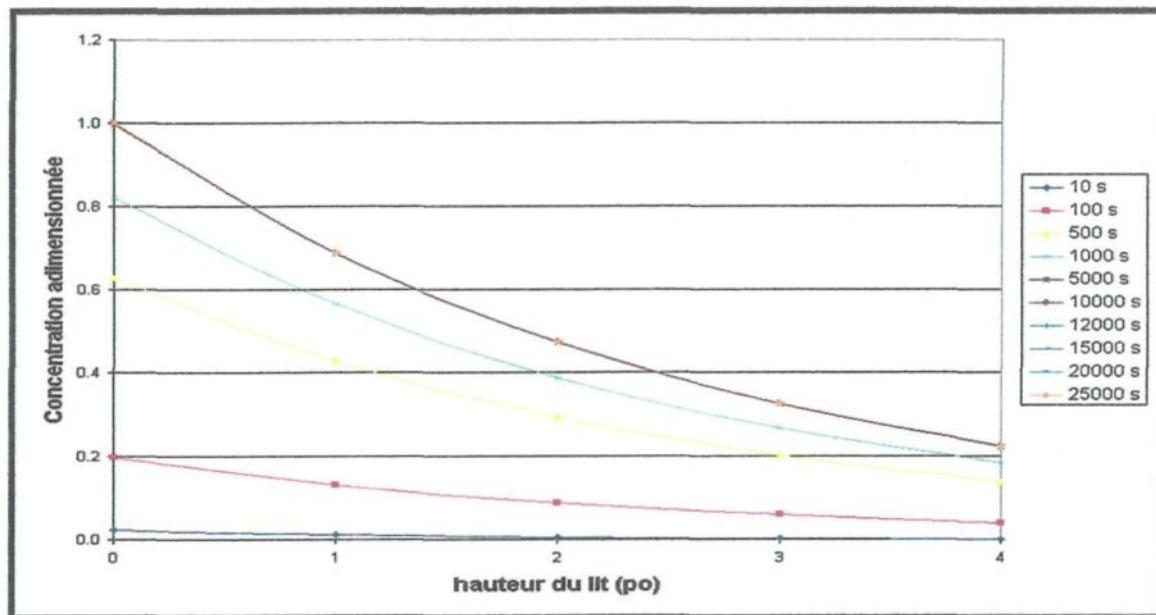


Figure 4.37 : Évolution de la concentration- écoulement continu -Série 7 (3.6 mm/s)

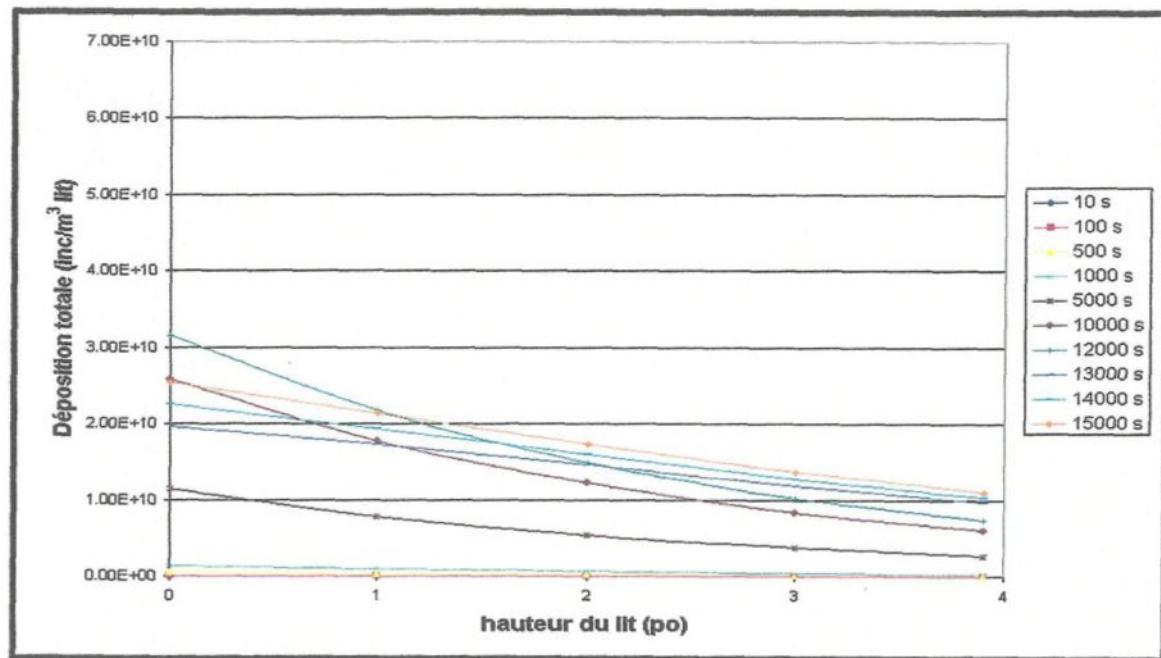


Figure 4.38 : Évolution de la déposition totale- écoulement continu -Série 7 (3.6 mm/s)

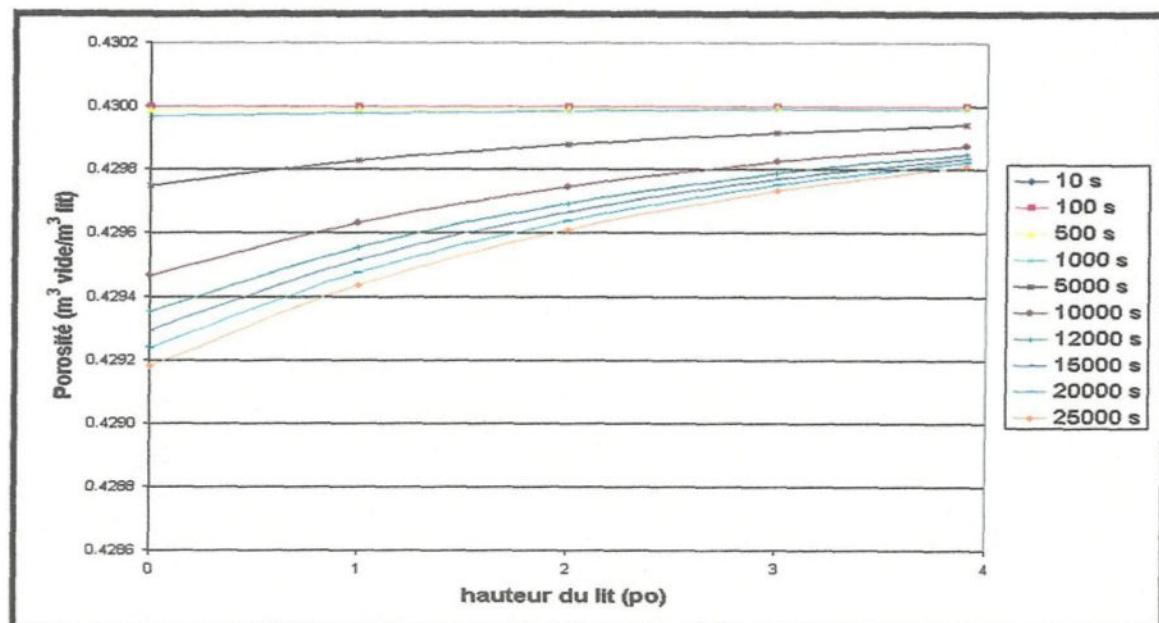


Figure 4.39 : Évolution de la porosité- écoulement continu -Série 7 (3.6 mm/s)

De façon générale, la série effectuée à une vitesse de 3.6 mm/s (série 7) présente des courbes de concentration plus élevées que les courbes obtenues aux conditions standards, à 1.8 mm/s. Puisque dans ces conditions, le filtre retient moins bien les inclusions, il est alors compréhensible que la teneur en inclusions dans l'eau soit plus importante. On remarque également que la concentration diminue moins drastiquement en fonction de la profondeur du lit qu'aux conditions standards. Ceci démontre bien que l'efficacité de filtration est affectée négativement dans ce genre de conditions. La déposition réagit de la même façon que précédemment et est donc plus importante pour le premier pouce du lit. La porosité diminue avec l'augmentation de déposition.

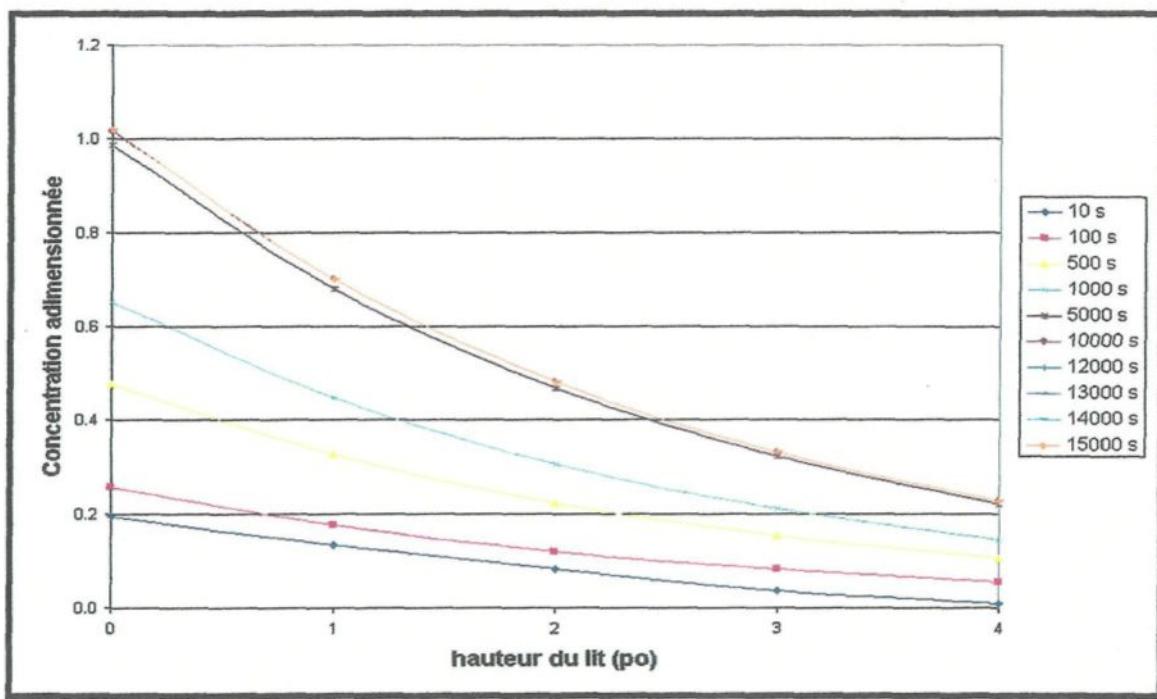


Figure 4.40 : Évolution de la concentration- écoulement interrompu -Série 8 (3.6 mm/s)

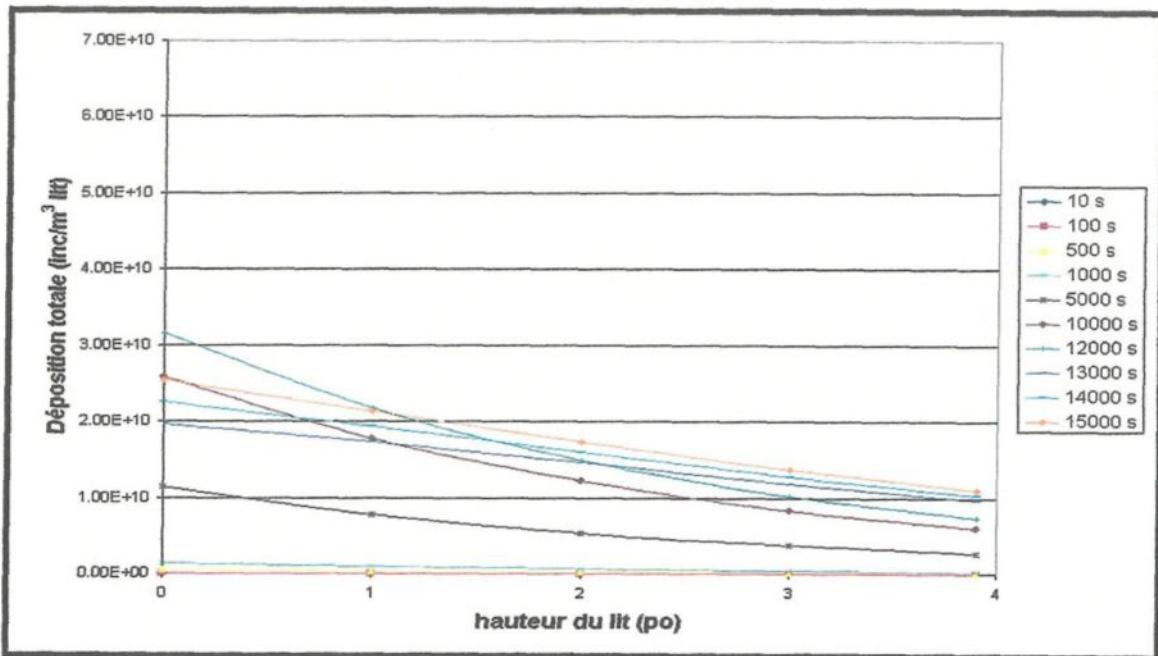


Figure 4.41: Évolution de la déposition totale- écoulement interrompu -Série 8 (3.6 mm/s)

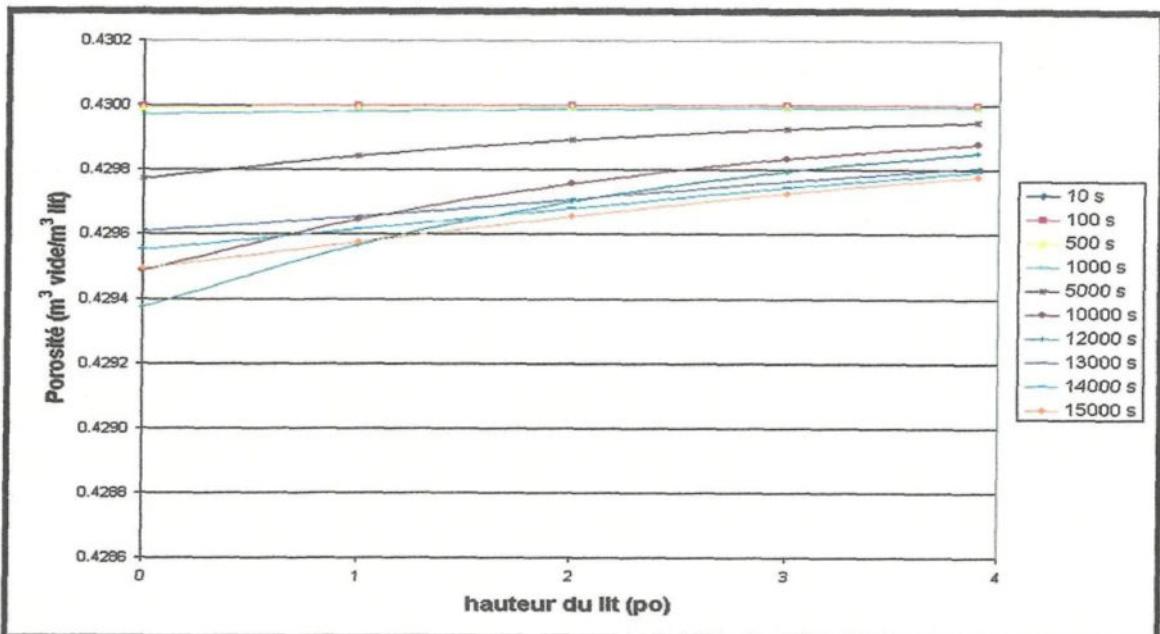


Figure 4.42: Évolution de la porosité - écoulement interrompu -Série 8 (3.6 mm/s)

Les mêmes observations peuvent être relevées de l'écoulement effectué en interrompu pour une vitesse de 3.6 mm/s, cependant comme les autres essais en écoulement interrompu, il est possible de dénoter une baisse de la déposition après cet interruption de la circulation du fluide à 12000 secondes pour le premier pouce du lit. Encore une fois, la porosité réagit tel que prévu.

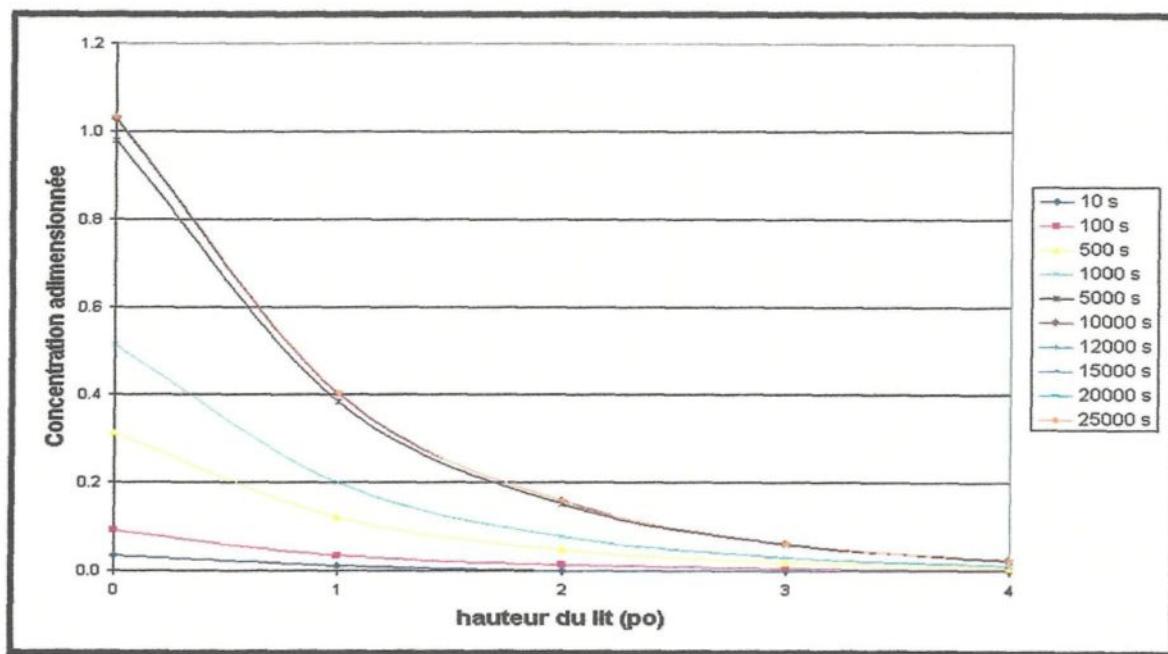


Figure 4.43: Évolution de la concentration - écoulement continu -
Série 9 (175 000 inc/kg eau)

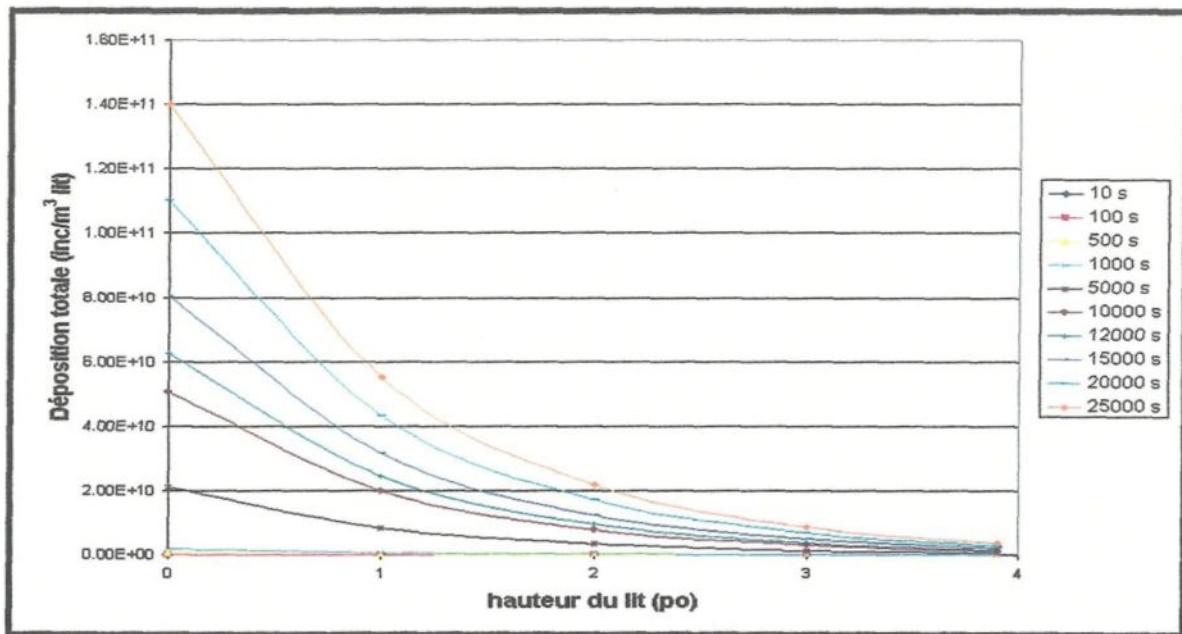


Figure 4.44: Évolution de la déposition totale - écoulement continu -
Série 9 (175 000 inc/kg eau)

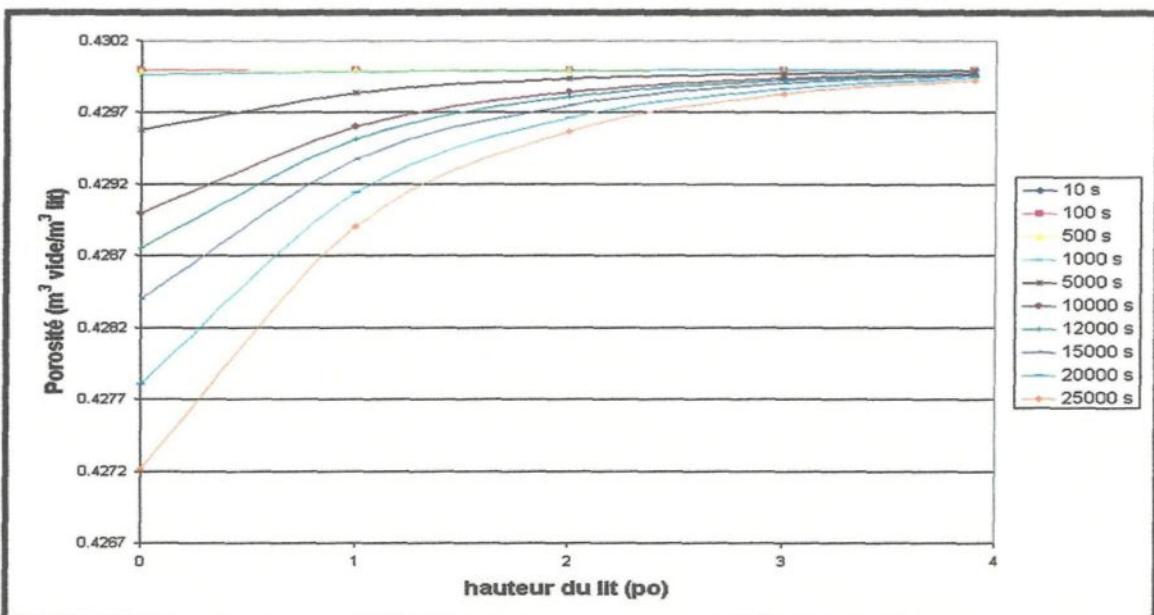


Figure 4.45: Évolution de la porosité - écoulement continu -
Série 9 (175 000 inc/kg eau)

La série 9 soumise à une concentration d'entrée de 175 000 inc/kg eau réagit aussi selon les normes. Les courbes de concentration obtenues diminuent d'une façon plus prononcée qu'aux conditions standards et démontrent que la déposition est favorisée par l'augmentation de concentration puisque cette dernière modifie la structure du filtre la rendant plus apte à retenir les inclusions suivantes. Aussi, comme il a été observé en expérimental, la déposition totale est plus importante pour ce genre de système. Évidemment, la porosité diminue de façon plus prononcée que la série effectuée aux conditions standards puisque la déposition est supérieure aux conditions de la série 1.

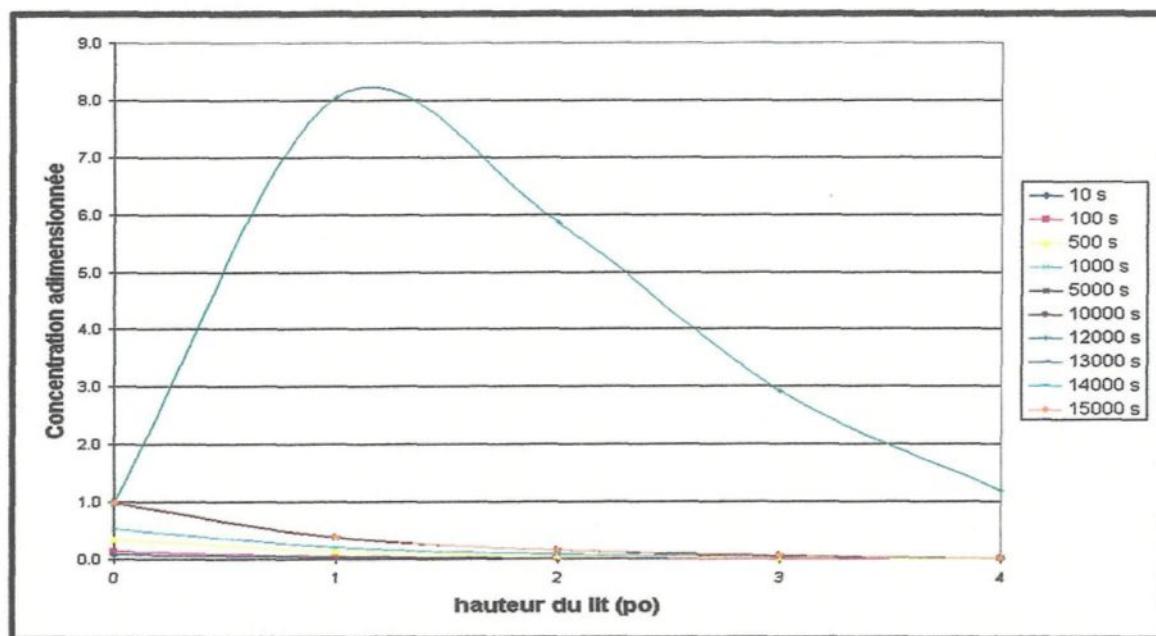


Figure 4.46: Évolution de la concentration - écoulement interrompu -
Série 10 (175 000 inc/kg eau)

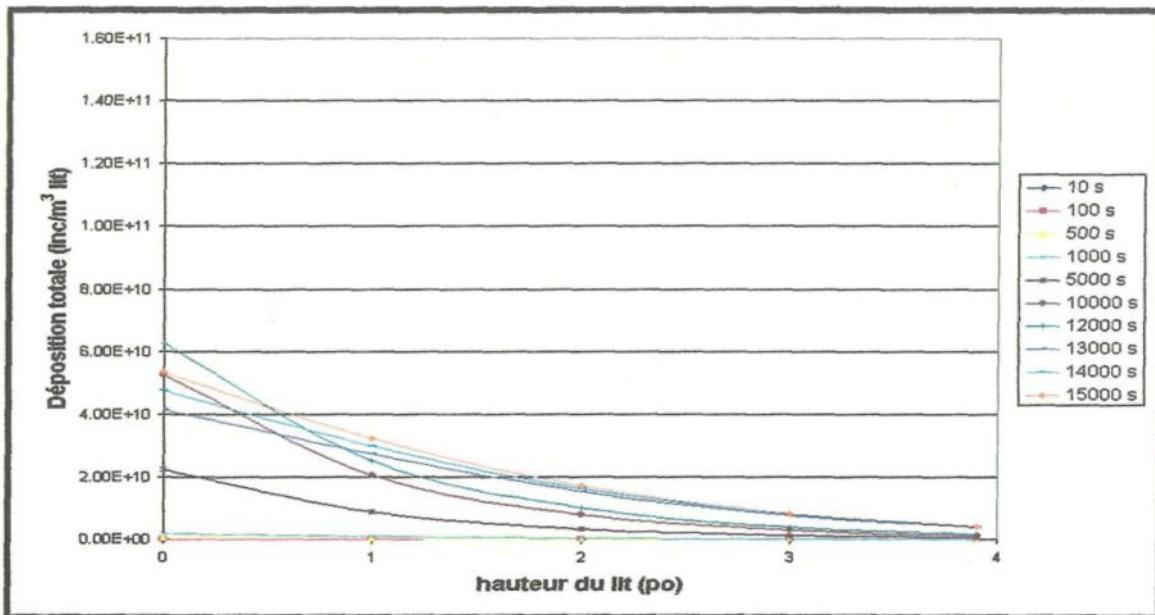


Figure 4.47: Évolution de la déposition totale - écoulement interrompu -
Série 10 (175 000 inc/kg eau)

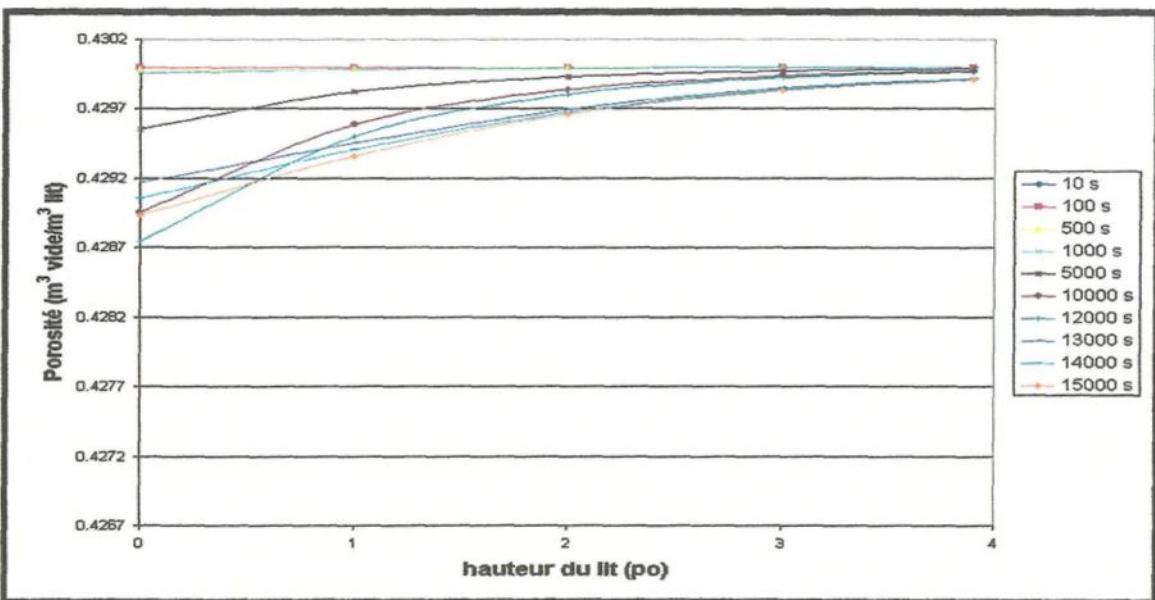


Figure 4.48: Évolution de la porosité - écoulement interrompu -
Série 10 (175 000 inc/kg eau)

Il est possible de retrouver les mêmes tendances que celles observées précédemment pour la série 10 effectuée en écoulement interrompu. Il est bien facile de reconnaître que l'interruption de l'écoulement déstabilise le système puisqu'au temps 12000 secondes, la relâche des inclusions capturées par le filtre provoque une hausse momentanée de la concentration des inclusions dans le fluide. Quant à la déposition et la porosité, elles se comportent comme dans tous les cas précédents.

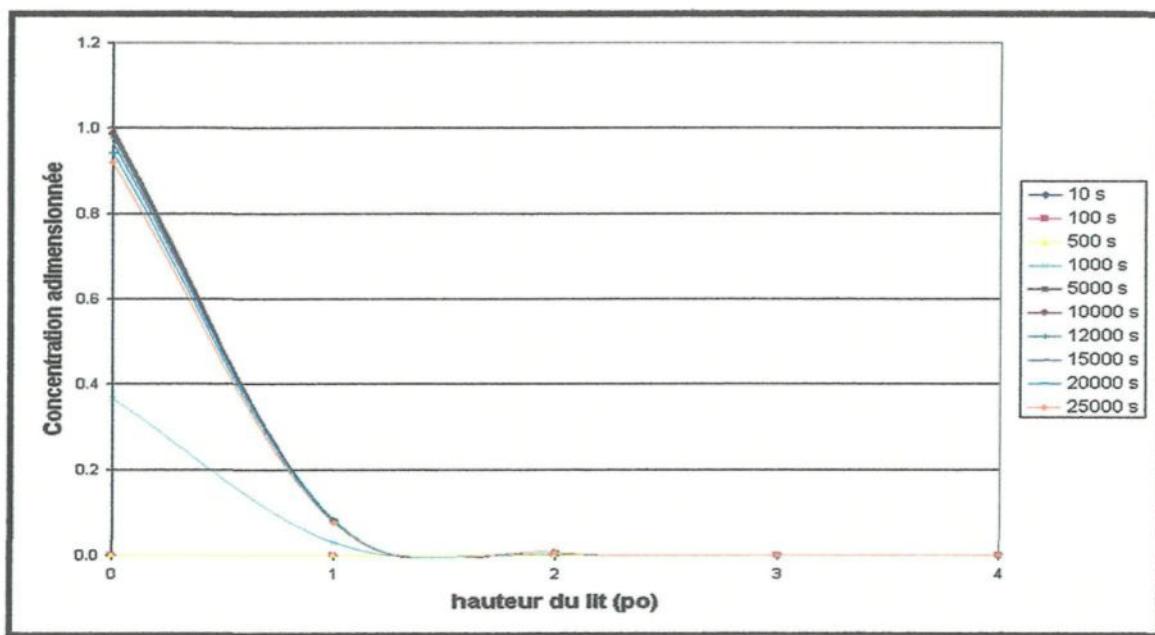


Figure 4.49: Évolution de la concentration - écoulement continu -
Série 11 (700 000 inc/kg eau)

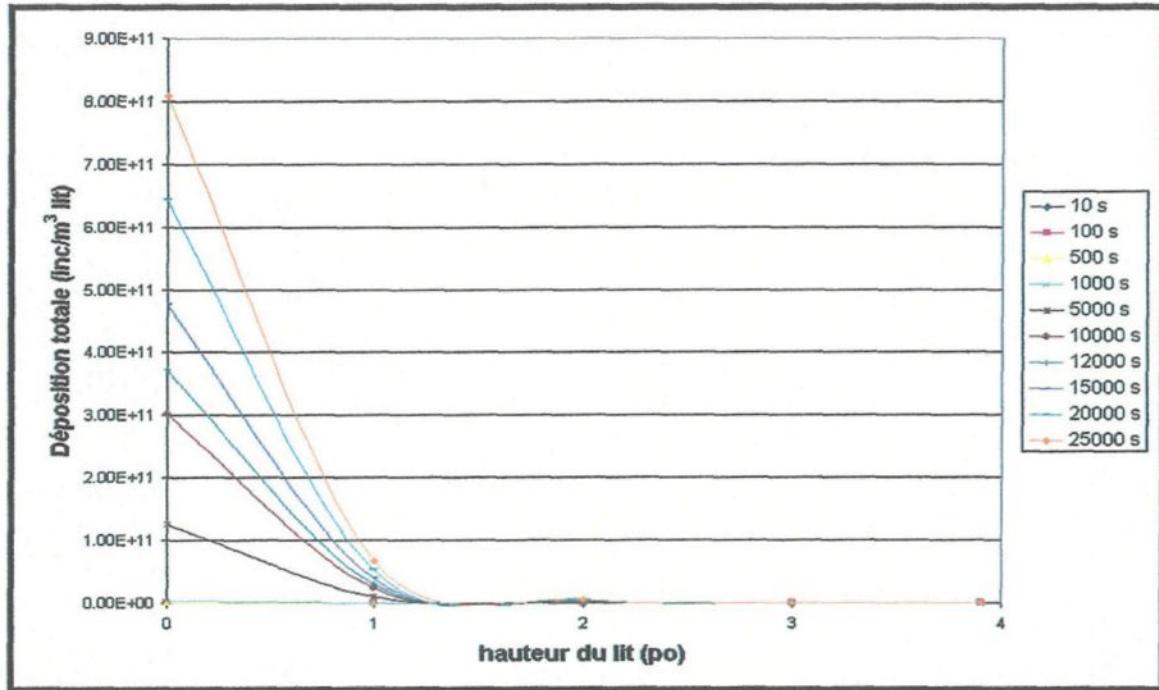


Figure 4.50: Évolution de la déposition totale - écoulement continu -
Série 11 (700 000 inc/kg eau)

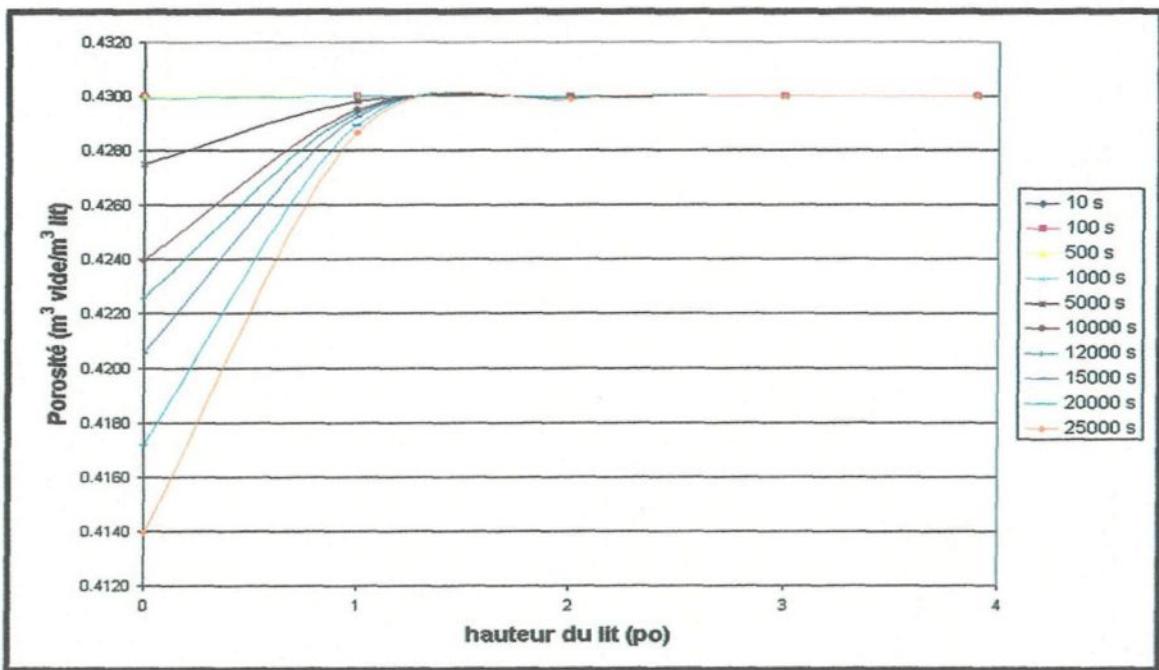


Figure 4.51: Évolution de la porosité - écoulement continu -
Série 11 (700 000 inc/kg eau)

Finalement, l'augmentation de la concentration à 700 000 inc/kg eau pour la série 11 démontre que c'est seulement le premier pouce qui capture la totalité des inclusions. Ce qui confirme que le réseau poreux du filtre accroît sa capacité de rétention avec une concentration plus élevée dans le système. Autrement, le comportement de la déposition est prévisible puisque cette dernière augmente avec le temps et est nettement supérieure à celle obtenue aux conditions standards comme il a été conclu dans le chapitre précédent. La porosité, quant à elle, diminue avec l'augmentation de la déposition et sa diminution est évidemment plus prononcée que celle obtenue aux conditions standards vu la déposition plus importante.

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1 Conclusions

De l'étude qualitative de cet ouvrage, il est possible de tirer certaines conclusions et de reconnaître les meilleures conditions pour favoriser l'accumulation et pour éviter la relâche des inclusions en écoulement continu et en écoulement interrompu. Voici les tableaux 5.1 et 5.2 résumant l'influence positive (+), négative (-) ou neutre (=) des paramètres étudiés en comparaison aux conditions standards:

Tableau 5.1 : Tableau résumé de l'influence des paramètres étudiés-écoulement continu

| | ↑ Hauteur du filtre | ↑ Diamètre des grains filtrants | ↑ Vitesse | ↑ Concentration d'entrée |
|--------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Accumulation | + | - | - | + |
| Relâche | Pas d'influence directe | Pas d'influence directe | Pas d'influence directe | Pas d'influence directe |

Tableau 5.2 : Tableau résumé de l'influence des paramètres étudiés-écoulement interrompu

| | ↑ Hauteur du filtre | ↑ Diamètre des grains filtrants | ↑ Vitesse | ↑ Concentration d'entrée |
|---------------------|---------------------|---------------------------------|-----------|--------------------------|
| Accumulation | + | - | - | + |
| Relâche | + | - | - | Pas d'influence directe |

Ainsi, il est possible de conclure que l'utilisation de plus petits grains avec un lit filtrant d'une hauteur appréciable favorise l'accumulation et minimise la relâche surtout lorsqu'un arrêt d'écoulement est effectué. L'augmentation de la taille des grains filtrants n'est pas recommandable pour favoriser la déposition et minimise l'effet positif qu'a l'augmentation de la hauteur du lit sur la relâche en écoulement interrompu. Quant à l'augmentation de la vitesse, elle a une influence négative sur la capacité de rétention du filtre, une légère tendance de déposition moindre est observée. Cependant, malgré la déposition à peine atténuée par l'augmentation de vitesse, la relâche en écoulement continu est semblable à celle obtenue par le modèle aux conditions standards. La relâche est accentuée de façon marquée par l'augmentation certaine des forces de cisaillement lors d'une interruption de la circulation du fluide dans le système.

Sachant que les producteurs d'aluminium tentent actuellement d'augmenter leur capacité de filtration par l'augmentation du débit de métal à filtrer, il est alors possible d'identifier ce

changement de condition d'opération comme un défi technologique important. Quant à l'augmentation de concentration, il est possible d'affirmer qu'elle favorise la déposition des inclusions dans le filtre. L'augmentation de la concentration dans le système n'a pas d'effet direct sur la relâche. Par contre, pour l'écoulement interrompu, il est possible d'affirmer qu'en favorisant l'accumulation, la relâche est favorisée également. Ainsi, les résultats de relâche sont plus élevés que ceux obtenus aux conditions standards pour certains essais en continu et pour la totalité des essais en interrompu tout simplement parce que la déposition est plus élevée. Finalement, il n'est pas possible de relier le changement du taux de filtration ou de la relâche pour chaque hauteur de lit à l'ordre de grandeur du changement de paramètre étudié. Les interactions entre les inclusions de PVC et les grains filtrants étant très complexes.

De l'étude quantitative de ce travail, il a été possible de déterminer pour chaque hauteur de lit et pour chaque paramètre étudié l'efficacité de filtration, le taux de déposition et la quantité d'inclusions déposées en écoulement continu et la quantité de particules relâchées en écoulement interrompu.

Aussi, dans cet ouvrage, un modèle a été créé afin de déterminer les expressions cinétiques d'accumulation, de relâche en écoulement continu et de relâche en écoulement interrompu qui permettent de faire un bilan net de déposition des inclusions dans un filtre d'alumine tabulaire. Le modèle créé permet de retracer avec fidélité les courbes expérimentales de déposition obtenues avec une moyenne d'écart de 19 %. Pourcentage d'écart grandement

satisfaisant vu l'objectif de trouver une expression unique pour chaque série de test effectuée. Le modèle crée permet aussi de relever l'évolution de la concentration dans le filtre, l'évolution de la déposition dans le filtre et l'évolution de la porosité en fonction du temps et de la profondeur du lit filtrant.

L'objectif de déterminer l'expression complète du bilan de masse effectué autour d'un filtre d'alumine tabulaire a donc été atteint et l'expression des coefficients K_1 et K_2 et des paramètres ajustables permettant d'obtenir la fonction de coefficients K_3 , fonction exprimant la relâche provoquée par l'interruption de l'écoulement sont résumés dans le tableau 5.3 que voici:

Tableau 5.3 : Résumé des coefficients et paramètres ajustables de la fonction de coefficients du bilan net de déposition

| Série | K_1 initial | K_2 initial | Paramètres ajustables de K_3 |
|-------|------------------|------------------|---|
| 1.1 | 53 | 1E+07 | |
| 3.1 | 23 | 5E+08 | |
| 5.1 | 11 | 2E+08 | |
| 7.1 | 53 | 1E+07 | |
| 9.1 | 66 | 1E+07 | |
| 11.1 | 66 | 1E+07 | |
| 2.1 | 53 | | $V_r=90\%$ $t_r=1000s$ $\alpha=0.2$ |
| 4.1 | 23 | | $V_r=90\%$ $t_r=1000s$ $\alpha=0.2$ |
| 6.1 | 11 | | $V_r=90\%$ $t_r=1000s$ $\alpha=0.2$ |
| 8.1 | 53 | | $V_r=90\%$ $t_r=1000s$ $\alpha=0.2$ |
| 10.1 | 66 | | $V_r=90\%$ $t_r=1000s$ $\alpha=0.2$ |

5.2 Recommandations

Si, dans le futur, on désire prolonger les essais de filtration afin d'observer la présence de la relâche en continu de façon plus prononcée dans les courbes expérimentales obtenues et, peut être à ce moment, déterminer une valeur de déposition critique, il faudra apporter certaines modifications au montage expérimental. En effet, le réservoir fournissant la solution concentrée en inclusions de PVC n'est pas assez volumineux pour gaver le système plus de 10 heures à raison de 200 ml/min. Ainsi, afin de ne pas interrompre le processus de filtration en préparant une nouvelle solution, et alors induire une instabilité de la concentration d'entrée, il serait préférable de remplacer ce réservoir par un plus gros. Aussi, dans les essais en écoulement interrompu, il serait préférable d'élever la sonde LiMCA immédiatement sous le filtre afin d'éviter les risques de turbulence dus à la prise d'aspiration du fluide au bas de la colonne. Il serait également intéressant de pouvoir tenir compte des inclusions supérieures aux inclusions de 25 μm , en minimisant le bruit par l'utilisation de concentrations d'inclusions très élevées, afin de déterminer leur influence sur le réseau poreux à l'intérieur du filtre et leur comportement de déposition. Ces inclusions constituent la moitié, en nombre et en volume, de l'ensemble de la distribution de granulométrie de PVC utilisée, l'autre moitié étant constituée de la plage d'inclusions étudiée de 20-25 μm .

Le modèle présenté dans cette thèse pourrait servir d'outil de simulation afin de prédire certains comportements de filtration pour certaines conditions d'opérations. Le coté utilitaire de ce modèle permet de changer la taille des inclusions, la teneur de ces dernières

dans le fluide, la densité du fluide porteur, la taille des grains filtrants et la porosité initiale du filtre afin d'adapter ce dernier au système étudié. Quant aux recommandations, elles ressemblent certainement plus à des suggestions. En effet, aux prochains utilisateurs qui désireraient parfaire la performance du modèle, il pourrait être intéressant de jumeler l'effet de la relâche en continu et en interrompu (cet aspect n'a pas été étudié vu la faible valeur obtenue de la relâche en continu et vu la précarité du modèle au moment de l'étude), il serait intéressant également d'évaluer l'influence de l'ensemble des inclusions dont la taille est inférieure ou supérieure à 25 μm afin de déterminer leur influence sur les phénomènes d'accumulation et de relâche, il serait aussi pertinent de déterminer l'impact de géométries de grains filtrants différentes de l'ellipse et finalement, d'inclure la distribution de la taille de ces derniers au lieu de ne considérer que la taille moyenne des particules d'alumine étudiées.

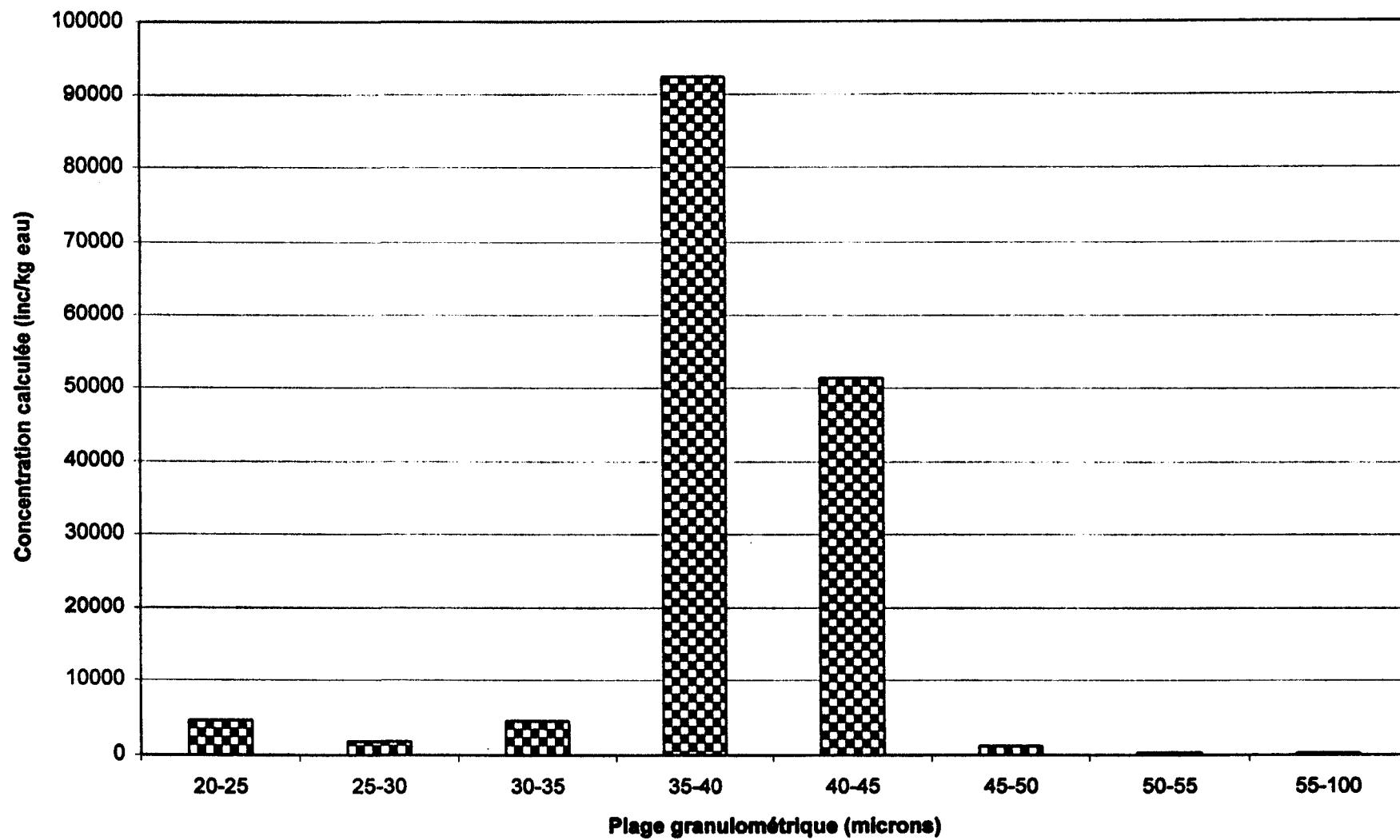
BIBLIOGRAPHIE

- 1 D. Apelian et L. Wang.
"Clean metal processing of aluminium alloys by filtering" 3rd International Conference on Aluminum Processing, p 7-35, 1994
- 2 Clément, G.
"The Pechiney deep bed filter : technology and performance", Light Metals, p. 1253-1262, 1995
- 3 Tien, C.
"Granular filtration of aerosols and hydrosols", Butterworths series in chemical engineering, Howard Brenner M.I.T p. 17-24, 1989
- 4 Destephen, J.A et Choi, K-J.
"Modelling of filtration processes of fibrous filter media", Separations Technology, 6, p. 55-67, 1996
- 5 Tien, C., Turian, R.M. et Pendse, H.
"Simulation of the Dynamic Behavior of Deep Bed Filters", Journal AICE, v. 25, No. 3, p. 385-395, 1979
- 6 Rajagopalan, R et Tien, C.
"Trajectory analysis of deep bed filtration with the Sphere-in-Cell porous media model", Journal AICE, v. 22, p. 523-533, 1976
- 7 Adin, A et Rajagopalan, R.
"Breakthrough curves in granular media filtration", Journal of environmental engineering, v. 115, p. 785-798, 1989
- 8 Kocaefe, D., Bui, R.T. et Waite, P.
"2D transient mathematical model of aluminium filtration", 129 ième congrès de la Société des minéraux, métaux et matériaux (TMS), Nashville, Tennessee p. 817-823, 12 au 16 mars 2000
- 9 Eckert, E., Miller, R.E., Apelian D. et Mutharasan R.
"Molten aluminum filtration : fundamentals and models", Light Metals, p. 1281-1289, 1984
- 10 Moran, D., Moran, M., Cushing, R. S et Lawler, D. F.
"Particle behavior in deep bed filtration: Part 1- Ripening and breakthrough / Part 2 – Particle detachment", Journal AWWA, p. 69-93, 1993

- 11 Chapdelaine, A.
“Optimization of molten aluminium filtration process: Part 1 – Physical and mathematical modelling”, Progress report #1, Alcan international limited, Arvida Research and Development Center, Jonquière 31 p. 1997
- 12 Mahmood, T.
“The mechanics of asymmetric particle release during filter backwashing”, These de doctorat UMI, Ann Arbor, Michigan, 1997
- 13 Kiss, L.I., Bui, R.T., Kocaebe, D., Fortin, Y. et Waite, P.
“Flow structure and stability of the deposition layer in deep-bed filters”, 130 ième congrès de la Société des minéraux, métaux et matériaux (TMS), New Orleans, Louisiana p. 979-1005, 11 au 15 février 2001
- 14 Chapdelaine, A.
“Manuel d'utilisation du LiMCA à eau” Rapport Alcan, Alain Chapdelaine Consultant, Jonquière 11 p. 1999
- 15 Murray-Chiasson, A.
“Résumé des principaux mécanismes d'interception lors de la filtration granulaire” Rapport de cours, Département des sciences appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Québec, Canada 15p. 2000
- 16 Chapdelaine, A.
“Notes et calculs relatifs à l'utilisation de la colonne filtrante” Rapport Alcan, Alain Chapdelaine Consultant, Jonquière 3p. 1999

ANNEXE 1 : RÉSULTATS DE CALIBRAGE DES PRÉAMPLIFICATEURS

Calibration des préamplificateurs



**ANNEXE 2 : PROCÉDURES DE PRÉPARATION DU MODÈLE
EXPÉRIMENTAL À EAU ET DES SONDES LIMCA**

Procédures de préparation du modèle expérimental à eau et des sondes LiMCA

Procédure de vidange de la colonne

1. Mettre la valve du filtre à sable à la position « backwash » et vider l'eau jusqu'au niveau de la sortie d'eau allant à la pompe.
2. Mettre la valve du filtre à la position drain et ouvrir la valve de la colonne en la mettant à la position horizontale;
3. Laisser vider complètement.

Procédure de nettoyage

1. Nettoyer la colonne à l'aide d'un boyau d'arrosage;
2. Dévisser les sondes LiMCA et brosser à l'aide d'une laine d'acier les deux sondes de laiton et nettoyer à l'eau. Nettoyer également le tube en verre qui contient une des deux sondes. (Répéter pour le deuxième ensemble de sondes sous le filtre);
3. Dévisser les boulons de la colonne et réserver;
4. Enlever le matériel filtrant. S'il est granulaire, faire tremper ce dernier dans l'eau chaude 2 heures;
5. Laver à l'aide d'un boyau d'arrosage, la partie inférieure de la colonne maintenant accessible;
6. Une fois le filtre granulaire trempé, laver les grains sous un jet d'eau à l'aide d'une trémie.

Procédure de remplissage

1. Fermer la valve de la colonne en la mettant en position verticale;
2. Mettre la valve du filtre à sable à la position « filter »;
3. Visser la première sonde LiMCA sous le filtre;
4. Remplir d'eau froide le bas de la colonne jusqu'à deux pouces au dessus du niveau du treillis supportant le filtre;
5. Mettre le matériel filtrant selon la hauteur désirée;
6. Boulonner à nouveau la colonne;
7. Visser la deuxième sonde LiMCA au dessus du filtre;
8. Remplir le reste de la colonne toujours à l'eau froide pour éviter le plus possible la formation de bulles d'air dans le système;
9. Une fois la colonne remplie, positionner la valve du filtre à sable à la position « drain » et mettre la pompe en marche. Une fois les conduites remplies d'eau, fermer la pompe et positionner à nouveau la valve du filtre à sable à la position « filter ». À ce moment, remettre la pompe en marche et compléter le niveau d'eau sous la marque inscrite sur le bassin d'entrée de la colonne;
10. Ajouter 1.5 kg de sel de table dans la colonne;
11. Insérer le barbotteur d'azote dans la bassin d'entrée de la colonne et ouvrir la valve de la bomonne d'azote;
12. Laisser le fluide en circulation au débit le plus élevé pendant une période de stabilisation de 24 heures.

Procédure de préparation de solution concentrée en inclusions

1. Vider le réservoir blanc s'il est plein par la valve prévue à cet effet au bas de ce dernier;
2. Fermer la valve et ensuite ajouter de l'eau froide jusqu'à la barre du 180 litres.
3. Ajouter 900 g de sel de table dans le réservoir (5 g de NaCl /L);
4. Peser la quantité nécessaire de PVC selon l'annexe 4.

**ANNEXE 3 : PROCÉDURE DE TEST POUR LES DEUX TYPES D'ÉCOULEMENT
ÉTUDIÉS**

Calcul relatif à la solution concentrée en inclusions de PVC

Solution concentrée en inclusions de PVC injectée

Afin de déterminer la quantité de PVC nécessaire pour atteindre la concentration d'inclusions voulue, il est possible de se servir des notes données en référence écrites par Chapdelaine. A. [16]. Cependant, ce calcul ne peut servir que de guide de départ. Dans le cadre des expériences effectuées pour cette étude, une quantité de 20 g de PVC a été utilisée dans 180 L d'eau pour obtenir une concentration d'environ 100 000 inc/kg eau.

Procédure de test pour les deux types d'écoulement étudiés

Procédure en écoulement continu

1. Mettre en marche l'agitateur du réservoir de solution concentrée;
2. Arrêter la pompe de circulation;
3. S'assurer qu'il ne reste plus d'air dans les sondes LiMCA. S'il reste de l'air, aspirer par l'ouverture cet air restant à l'aide d'une seringue;
4. Placer les deux préamplificateurs sur les deux ensembles de sondes LiMCA, la fiche rouge sur la sonde à l'intérieur du verre, la fiche noire sur la sonde à l'extérieur du verre;
5. Calibrer le dosage de solution concentrée à l'aide d'une montre et d'un cylindre gradué pour le débit désiré (pour cette étude : 200 ml/min de solution injectée);
6. Ouvrir l'appareil Dosimat ainsi que l'appareil LiMCA;
7. Ouvrir le logiciel LiMCA;
8. Entrer le nom du test effectué et peser sur une touche;
9. Peser sur F6 pour prendre de façon manuelle la valeur de concentration obtenue en entrée du filtre. Peser sur F7 pour prendre de façon manuelle la valeur de concentration obtenue à la sortie du filtre. La valeur de N-20 ne doit pas excéder de dix fois la valeur de N20. Cette manœuvre permettra de vérifier la propreté de l'eau. Effectuer ces mesures 2 ou 3 fois;
10. Peser la quantité nécessaire de PVC selon la référence [16] afin de déterminer la quantité de PVC à ajouter dans le bassin d'entrée;

11. Ajouter la quantité de PVC nécessaire dans le bassin et mettre en marche l'agitateur du bassin d'entrée du système;
12. Reprendre quelques données de concentration à l'entrée et à la sortie de façon manuelle à l'aide des touches F6 et F7 respectivement;
13. Attendre d'atteindre une concentration d'entrée d'environ 25 000 inclusions/kg d'eau;
14. Peser sur F10 pour partir l'enregistrement;
15. Partir la pompe de circulation;
16. Vérifier le débit de circulation;
17. Peser sur shiftF7 pour partir la prise de mesure de façon automatique;
18. Vider à quelques reprises la bouteille du Dosimat afin qu'elle ne déborde pas;
19. Laisser le système fonctionner pendant 7 heures.

Procédure en écoulement interrompu

1. Répéter les étapes 1 à 17;
2. À la 12 000 ^{ième} seconde, arrêter la pompe de circulation pendant 5 minutes;
3. Remettre en marche la pompe de circulation;
4. Vérifier le débit de circulation;
5. Vider à quelques reprises la bouteille du Dosimat afin qu'elle ne déborde pas.

**ANNEXE 4 : CALCUL RELATIF À LA SOLUTION CONCENTRÉE EN
INCLUSIONS DE PVC**

Calcul relatif à la solution concentrée en inclusions de PVC

Solution concentrée en inclusions de PVC injectée

Afin de déterminer la quantité de PVC nécessaire pour atteindre la concentration d'inclusions voulue, il est possible de se servir des notes données en référence écrites par Chapdelaine. A. [16]. Cependant, ce calcul ne peut servir que de guide de départ. Dans le cadre des expériences effectuées pour cette étude, une quantité de 20 g de PVC a été utilisée dans 180 L d'eau pour obtenir une concentration d'environ 100 000 inc/kg eau.

ANNEXE 5 : CARACTÉRISTIQUES DES GRAINS FILTRANTS ÉTUDIÉS

Caractéristiques des grains filtrants étudiés

Alumine tabulaire 1.5-3 mm de diamètre

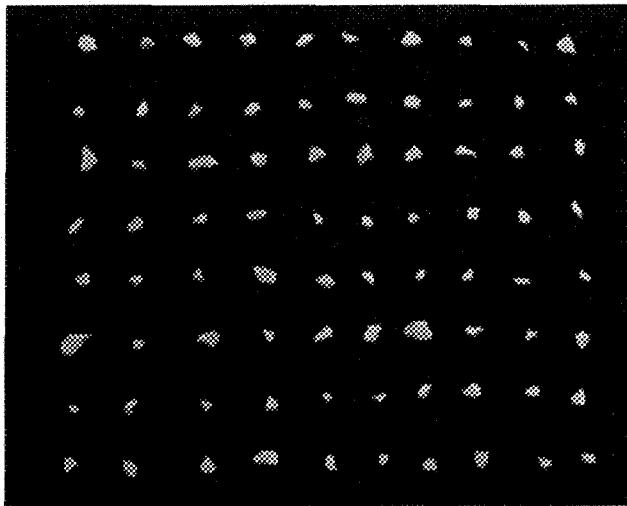


Tableau a : Caractéristiques des grains d'alumine tabulaire de 1.5-3 mm de diamètre

| | Longueur (axe a) | Largeur (axe b) | Angle feret | Sphéricité | Ratio asp |
|------------|---------------------|--------------------|-------------|------------|-----------|
| Minimum | 2.22 | 1.09 | 2.02 | 0.37 | 1.13 |
| Maximum | 6.48 | 4.08 | 5.19 | 1.00 | 3.06 |
| Moyenne | 3.56 | 2.36 | 3.04 | 0.71 | 1.55 |
| Écart type | 0.81 | 0.59 | 0.66 | 0.15 | 0.33 |

Alumine tabulaire 3-6 mm de diamètre

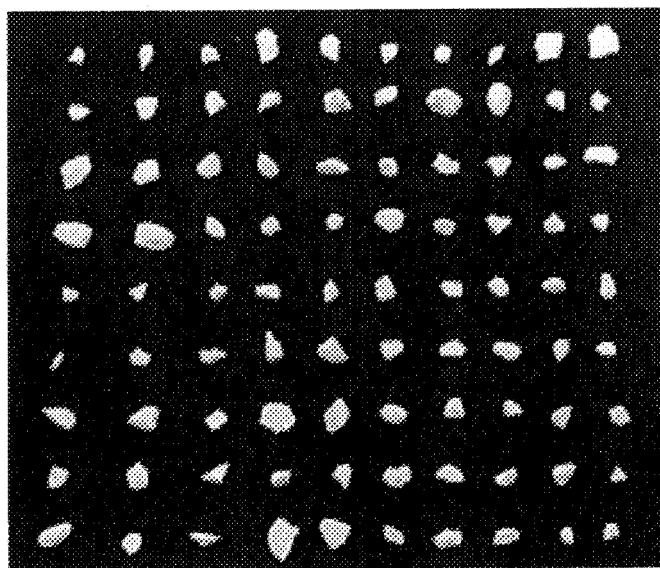


Tableau b : Caractéristiques des grains d'alumine tabulaire de 3-6 mm de diamètre

| | Longueur (axe a) | Largeur (axe b) | Angle feret | Sphericité | Ratio asp |
|-------------------|---------------------|--------------------|-------------|------------|-----------|
| Minimum | 2.08 | 0.42 | 1.45 | 0.28 | 1.15 |
| Maximum | 10.94 | 8.33 | 9.71 | 1.00 | 8.00 |
| Moyenne | 6.77 | 4.49 | 5.77 | 0.62 | 1.85 |
| Ecart type | 1.99 | 1.67 | 1.75 | 0.17 | 1.19 |

Alumine tabulaire 6-12 mm de diamètre

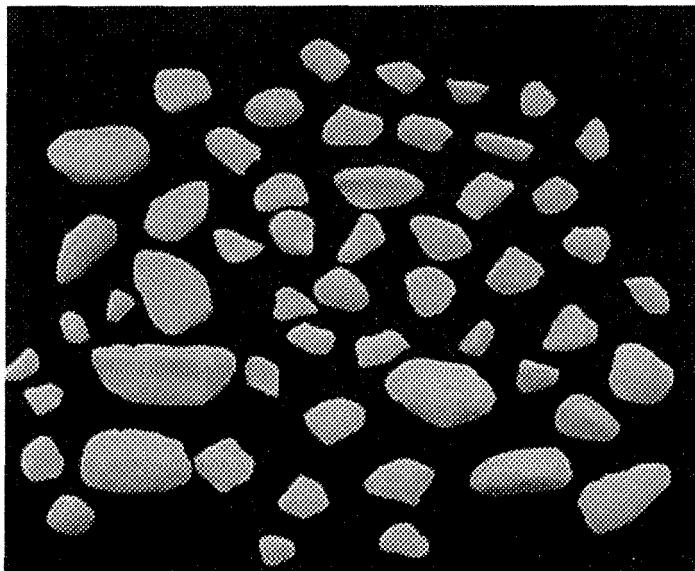


Tableau c : Caractéristiques des grains d'alumine tabulaire de 6-12 mm de diamètre

| | Longueur (axe a) | Largeur (axe b) | Angle feret | Sphéricité | Ratio asp |
|------------|---------------------|--------------------|-------------|------------|-----------|
| Minimum | 8.76 | 5.89 | 8.11 | 0.70 | 1.08 |
| Maximum | 37.62 | 17.72 | 29.01 | 1.00 | 2.65 |
| Moyenne | 15.99 | 10.48 | 13.49 | 0.88 | 1.53 |
| Écart type | 5.81 | 2.82 | 4.39 | 0.06 | 0.31 |

ANNEXE 6 : DESCRIPTIONS DES VALEURS \bar{C} ET $\bar{\sigma}$

Calcul relatif à la solution concentrée en inclusions de PVC

Solution concentrée en inclusions de PVC injectée

Afin de déterminer la quantité de PVC nécessaire pour atteindre la concentration d'inclusions voulue, il est possible de se servir des notes données en référence écrites par Chapdelaine. A. [16]. Cependant, ce calcul ne peut servir que de guide de départ. Dans le cadre des expériences effectuées pour cette étude, une quantité de 20 g de PVC a été utilisée dans 180 L d'eau pour obtenir une concentration d'environ 100 000 inc/kg eau.

Description des équations de différences finies

Les équations de concentration et de déposition adimensionnées que le modèle doit résoudre sont décrites dans le texte qui suit :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial(\varepsilon \bar{C})}{\partial \bar{t}} + \bar{K}_1 \bar{C} - \bar{K}_{23} \bar{\sigma} = 0 \quad (\text{A6.1})$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{t}} = \bar{K}_1 \bar{C} - \bar{K}_{23} \bar{\sigma} \quad (\text{A6.2})$$

où $\bar{K}_{23} = ((\bar{K}_2 + \bar{K}_3)L / u_s)$ ou $\bar{K}_{23} = \bar{K}_2 + \bar{K}_3$

on a \bar{C} et $\bar{\sigma}$, deux variables, deux équations.

Par la méthode numérique des différences finies on retrouve les deux expressions suivantes :

$$\bar{\sigma}_n^{\bar{t} + \Delta \bar{t}} = \left(\frac{1}{1 + \bar{K}_{23} \Delta \bar{t}} \right) \bar{\sigma}_n^{\bar{t}} + \left(\frac{\bar{K}_1 \Delta \bar{t}}{2(1 + \bar{K}_{23} \Delta \bar{t})} \right) \bar{C}_{n+1}^{\bar{t} + \Delta \bar{t}} + \left(\frac{\bar{K}_1 \Delta \bar{t}}{2(1 + \bar{K}_{23} \Delta \bar{t})} \right) \bar{C}_n^{\bar{t} + \Delta \bar{t}} \quad (\text{A6.3})$$

$$\begin{aligned}
\bar{C}_{n+1}^{\bar{t}+\Delta\bar{t}} = & -\frac{\left[1 - \frac{2\Delta\bar{t}}{\varepsilon\Delta\bar{z}} + \frac{\bar{K}_1\Delta\bar{t}}{\varepsilon} - \frac{\bar{K}_1\bar{K}_{23}\Delta\bar{t}^2}{\varepsilon(1+\bar{K}_{23}\Delta\bar{t})}\right]\bar{C}_n^{\bar{t}+\Delta\bar{t}} +}{\left[1 + \frac{2\Delta\bar{t}}{\varepsilon\Delta\bar{z}} + \frac{\bar{K}_1\Delta\bar{t}}{\varepsilon} - \frac{\bar{K}_1\bar{K}_{23}\Delta\bar{t}^2}{\varepsilon(1+\bar{K}_{23}\Delta\bar{t})}\right]} \\
& \left[\bar{C}_{n+1}^{\bar{t}} + \bar{C}_n^{\bar{t}} + \left(\frac{2\Delta\bar{t}\bar{K}_{23}}{\varepsilon(1+\bar{K}_{23}\Delta\bar{t})} \right) \bar{\sigma}_n^{\bar{t}} \right] \\
& \left[1 + \frac{2\Delta\bar{t}}{\varepsilon\Delta\bar{z}} + \frac{\bar{K}_1\Delta\bar{t}}{\varepsilon} - \frac{\bar{K}_1\bar{K}_{23}\Delta\bar{t}^2}{\varepsilon(1+\bar{K}_{23}\Delta\bar{t})} \right]
\end{aligned} \tag{A6.4}$$

**ANNEXE 7 : DÉVELOPPEMENT DE LA COURBE NORMALE DE
DISTRIBUTION DU MODÈLE**

Calcul relatif à la solution concentrée en inclusions de PVC

Solution concentrée en inclusions de PVC injectée

Afin de déterminer la quantité de PVC nécessaire pour atteindre la concentration d'inclusions voulue, il est possible de se servir des notes données en référence écrites par Chapdelaine. A. [16]. Cependant, ce calcul ne peut servir que de guide de départ. Dans le cadre des expériences effectuées pour cette étude, une quantité de 20 g de PVC a été utilisée dans 180 L d'eau pour obtenir une concentration d'environ 100 000 inc/kg eau.

Description de la courbe de distribution

La courbe de distribution a été choisie afin de reproduire ce qui est observé en laboratoire.

Lors du nouveau départ de l'écoulement, après que celui-ci ait été interrompu, les données de concentrations d'inclusions dans l'eau sortant du filtre prennent la forme d'une courbe de distribution qui s'étend sur une certaine période et qui possède un maximum peu après le commencement de cette dernière. Voici l'Aspect général de cette courbe :

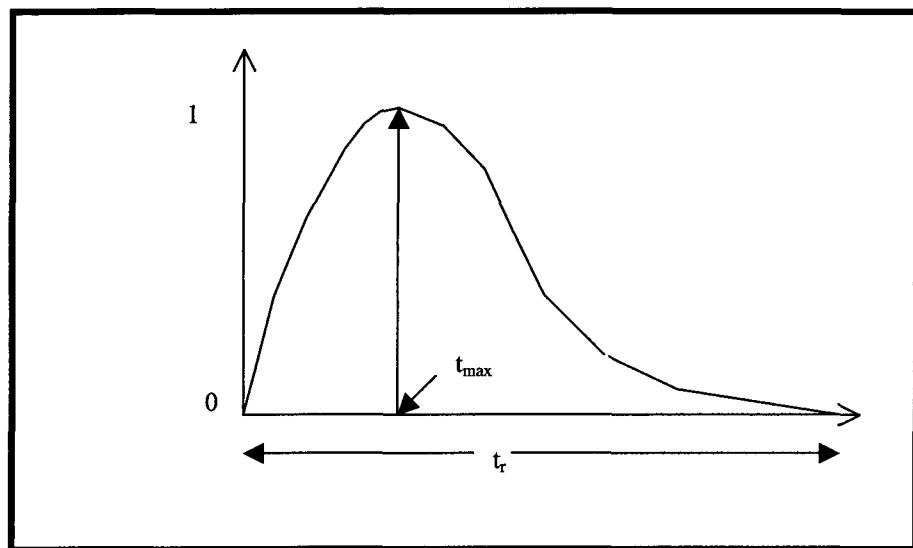


Figure A6.1 : Courbe de distribution

Ainsi la courbe qui se rapproche le plus des observations expérimentales s'exprime de cette façon :

$$y = M_1 t^\alpha e^{-M_2 t} \quad (A7.1)$$

Afin de connaître M_1 et M_2 deux états sont analysés :

1. $\frac{dy}{dt} = 0$ à $t = t_{\max}$ puisque la dérivée est nulle au moment où le maximum de la fonction de relâche est atteint.

$$\frac{dy}{dt} = M_1 e^{-M_2 t} (\alpha t^{\alpha-1}) + M_1 t^\alpha e^{-M_2 t} (-M_2) \quad (\text{A7.2})$$

$$\Rightarrow \alpha t^{\alpha-1} = M_2 t^\alpha$$

$$\Rightarrow M_2 = \cancel{\alpha/t}$$

$$\Rightarrow M_2 = \cancel{\alpha/t}_{\max}$$

2. $y = 1$ à $t = t_{\max}$

$$1 = M_1 t_{\max}^\alpha e^{-\alpha} \quad (\text{A7.3})$$

$$\Rightarrow M_1 = \left(\frac{e}{t_{\max}} \right)^\alpha$$

Donc,

$$y = \left(\frac{et}{t_{\max}} \right)^\alpha e^{-\left(\cancel{\alpha/t}_{\max} \right)} \quad (\text{A7.4})$$

où

$$\tau = \cancel{t/t}_{\max}$$

où t est la durée exprimant la différence entre le temps présent et le moment où l'écoulement a été arrêté.

$$y = (e\tau)^\alpha e^{-\alpha\tau} \Rightarrow (\tau e^{1-\tau})^\alpha$$

ANNEXE 8 : LISTE DES PARAMÈTRES DU MODÈLE MODIFIABLES

Description des paramètres du modèle qui peuvent être modifiés

Voici les paramètres du modèle mathématique qui peuvent être modifiés pour des études futures.

Tableau A8.1 : Description des paramètres qui peuvent être modifiés dans le modèle

| | Paramètres du modèle | Symbole (si applicable) |
|----|---|-------------------------|
| 1 | Constante d'accumulation | k_1 |
| 2 | Constante de relâche | k_2 |
| 3 | Vitesse superficielle | u_s |
| 4 | Densité du liquide filtré | ρ_l |
| 5 | Diamètre du filtre | |
| 6 | Axe le plus long du grain filtrant (ellipse) | a |
| 7 | Axe le plus court du grain filtrant (ellipse) | b |
| 8 | Pourcentage du volume d'inclusions relâchées en écoulement interrompu | V_r |
| 9 | Diamètre des inclusions | d_i |
| 10 | Porosité initiale du filtre | ε_0 |
| 11 | Porosité de la couche d'inclusions déposées | ε_d |
| 12 | Durée de l'arrêt d'écoulement (en interrompu) | |
| 13 | Durée de la relâche des inclusions (après arrêt de l'écoulement) | t_r |