

**Doctorat en Ingénierie**

Département des sciences appliquées

Thèse présentée à l'Université du  
Québec à Chicoutimi comme  
exigence partielle du Doctorat

**Utilisation d'une technique de traçage ferromagnétique  
pour étudier le comportement et le déplacement des  
boues rouges dans un décanteur**

**Par :**

Marie-Louise Bouchard

**Date :**

30 Mars 2011

**À mes parents Suzanne et Fernand**

## RÉSUMÉ

L'alumine est extraite de la bauxite grâce au procédé Bayer. Au cours de l'étape de décantation de ce procédé, les particules de boues rouges sont séparées de la liqueur contenant l'aluminate par floculation et décantation. Étant donné l'augmentation des demandes en alumine et la diminution de la qualité des bauxites disponibles, les décanteurs se doivent d'être plus grands et plus performants pour répondre à la demande. Conséquemment, la compréhension des déplacements de la boue rouge à l'intérieur des décanteurs devient très importante pour optimiser l'étape de séparation solide/liquide.

Cette thèse présente une étude effectuée dans le cadre du programme de doctorat en ingénierie de l'Université du Québec à Chicoutimi, portant sur le développement d'une méthodologie permettant d'identifier et de comprendre les comportements caractéristiques et les déplacements des boues rouges. Il est difficile d'effectuer la mesure de la distribution du temps de résidence « RTD » des décanteurs, étant donné la nature chimique agressive du procédé Bayer. Une méthodologie expérimentale de traçage ferromagnétique a été développée afin d'effectuer des essais de traçage dans des décanteurs de boue rouge. Ainsi, en utilisant un traceur de poudre de fer, il est possible de simuler le comportement et le déplacement des boues rouges. Le traceur est détecté par des variations de la densité du flux magnétique entourant une bobine d'induction. En mesurant la fréquence de résonance d'un

circuit LC, la masse de particules de fer présente dans la bobine est mesurée. La limite de détection de l'appareil de mesure pour des essais de traçage en continu est de 0,10 g de fer par litre de boue avec un écart-type de 13 %. Les courbes de calibrations de l'appareil de mesure dépendent cependant du type de boue, de la concentration solide de la boue et du volume de boue présent dans la bobine de mesure en plus d'être sensible aux vibrations.

Les courbes RTD représentent la somme des écoulements existants à l'intérieur du décanteur. Une méthode d'analyse basée sur le modèle mathématique des réservoirs en série et sur la décomposition en pics des courbes RTD a été développée. La décomposition s'effectue selon l'importance des pics. L'écoulement associé à ces pics est soustrait tour à tour de l'écoulement global jusqu'à ce que les pics présents dans la courbe d'écoulement global ne puissent plus être différenciés du bruit expérimental. L'écoulement global du décanteur a été décomposé en cinq types d'écoulement occupant trois zones principales : zone active rapide près du centre ( $r = 0$ ), zone intermédiaire ( $r = 0,5 r$ ) et zone lente en périphérie ( $r = r$ ). Ces pics sont associés au déplacement de la boue dans la section conique du décanteur sous l'action du râteau. Une autre zone d'écoulement est associée au délai de la RTD située entre l'origine et le début de la courbe. Ce délai est associé à une zone d'écoulement PFR existant dans la portion cylindrique du décanteur. Des injections localisées ont permis de valider l'interprétation de la méthode de décomposition. Grâce à cette technique, il a été possible d'observer des signatures typiques de problématiques industrielles telles que les courts-circuits ou « rat hole », les volumes morts, l'action des râteaux, etc.



## REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier André Leclerc, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi et directeur du présent projet de doctorat, pour son aide et ses conseils sur le domaine du traçage ferromagnétique. Merci également à Guy Simard, co-directeur du projet et professionnel de recherche de l'UQAC, pour ses conseils et son expertise sur le déplacement des boues rouges dans les décanteurs.

Merci aussi à tous les membres du Groupe de Recherche Universitaire en Séparation Solide/Liquide (GRUSSL) : techniciens, professeurs et chercheurs pour leurs supports dans la réalisation de ce projet. L'auteur tient également à adresser un remerciement tout particulier à François Girard, technicien à l'UQAC (GRUSSL) pour sa contribution au cours des essais expérimentaux.

L'auteur remercie également la société Rio-Tinto-Alcan (RTA) et le Centre de Recherche et de Développement Arvida (CRDA) pour son support financier et l'expertise technique des techniciens et des chercheurs. Merci à Alain Boivin, chercheur chez RTA, pour les travaux préliminaires effectués dans la conception de l'appareil de mesure du fer. Merci également au Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) pour son support monétaire sous forme de bourse à Incidence Industrielle.

## LISTE DES SYMBOLES

### Lettres italiques

|               |  |                                    |
|---------------|--|------------------------------------|
| $A$           | Aire projetée de la particule                          | $m^2$                              |
| $a_0$         | Aire du pic  | $m^2$                              |
| $a_1$         | Centre du pic  | $m$                                |
| $a_2$         | Largeur du pic   | $m$                                |
| $a_3$         | Constante de temps                                     | $s$                                |
| Aire          | Surface spécifique d'un décanteur                      | $m^2 / \text{tonne} / \text{jour}$ |
| $Aire_{lame}$ | Surface de la lame                                     | $m^2$                              |
| $b$           | Indice d'écoulement                                    | [ ]                                |
| $\vec{B}$     | Densité du flux magnétique                             | $T$                                |
| $C$           | Capacité   | $F$                                |
| $C$           | Concentration des solides en fraction volumique        | [ ]                                |
| $C_0$         | Concentration initiale du traceur en injection échelon | $g / m^3$                          |
| $C_d$         | Coefficient de traînée                                 | [ ]                                |
| $C_{entrée}$  | Concentration à l'entrée du bilan massique             | $g / m^3$                          |
| $C_{in}(t)$   | Concentration du traceur à l'entrée                    | $g / m^3$                          |
| $C_{max}$     | Concentration de traceur maximale en injection échelon | $g / m^3$                          |

|                          |  |                         |
|--------------------------|--|-------------------------|
| $C_{out}(t)$             | Concentration du traceur à la sortie                                 | $\text{g} / \text{m}^3$ |
| $C_{out}(V)$             | Concentration du traceur à la sortie selon RVD                       | $\text{g} / \text{m}^3$ |
| Compaction               | La compaction  | % (poids / poids)       |
| $C_{sortie}$             | Concentration à la sortie du bilan massique                          | $\text{g} / \text{m}^3$ |
| $C_{souseverse}$         | Concentration solide de la boue à la sousverse                       | $\text{g} / \text{L}$   |
| CSTR                     | Réacteur continu parfaitement agité                                  | [ ]                     |
| $C(t)$                   | Concentration du traceur à la sortie en fonction du temps            | $\text{g} / \text{m}^3$ |
| $C(t)_{\text{écheleon}}$ | (Concentration du traceur en fonction du temps) <sub>écheleon</sub>  | $\text{g} / \text{m}^3$ |
| cte                      | Constante prenant la valeur de 4 ou 6                                | [ ]                     |
| $C(V)$                   | Concentration du traceur à la sortie en fonction du volume           | $\text{g} / \text{m}^3$ |
| $C(V)_{\text{écheleon}}$ | (Concentration du traceur en fonction du volume) <sub>écheleon</sub> | $\text{g} / \text{m}^3$ |
| $C(Z)$                   | Concentration du traceur à la sortie en fonction de Z                | $\text{g} / \ll Z \gg$  |
| D                        | Coefficient de dispersion  | $\text{m}^2 / \text{s}$ |
| $d$                      | Diamètre de la particule   | m                       |
| $d_{fer}$                | Diamètre de la particule de fer                                      | m                       |
| $d_{particule}$          | Diamètre de la particule de boue                                     | m                       |
| De                       | Nombre de Dean   | [ ]                     |
| E                        | Bilan énergétique des forces   | N                       |
| $E_A$                    | Forces d'attraction  | N                       |
| $E_B$                    | Forces de répulsion électrostatique                                  | N                       |

|                          |  |                                 |
|--------------------------|--|---------------------------------|
| $E_{\text{inf}}$         | Point d'inflexion selon la courbe $E(t)$                     | $\text{s}^{-1}$                 |
| $E_{\text{max}}$         | Sommet de la courbe $E(t)$                                   | $\text{s}^{-1}$                 |
| erf                      | Fonction erreur  | [ ]                             |
| $E_S$                    | Maximum répulsif   | N                               |
| $E(t)$                   | Fonction de la RTD par unité de temps                        | $\text{s}^{-1}$                 |
| $E(V)$                   | Fonction de la RVD par unité de volume                       | $1 / \text{m}^3$                |
| $E(Z)$                   | Fonction de la RVD normalisée                                | [ ]                             |
| $E(Z')$                  | Fonction de la RVD normalisée pour débit et volume variables | [ ]                             |
| $E(\theta)$              | Fonction de la RTD normalisée                                | [ ]                             |
| $E_{\theta, \text{inf}}$ | Point d'inflexion selon la courbe $E(\theta)$                | [ ]                             |
| $E_{\theta, \text{max}}$ | Sommet de la courbe $E(\theta)$                              | [ ]                             |
| $f$                      | Fréquence  | Hz                              |
| $f_{\text{résonance}}$   | Fréquence de résonance                                       | Hz                              |
| $F_b$                    | Force de flottabilité  | N ou $\text{kg m} / \text{s}^2$ |
| $F_f$                    | Force de friction  | N ou $\text{kg m} / \text{s}^2$ |
| $F_g$                    | Force gravitationnelle                                       | N ou $\text{kg m} / \text{s}^2$ |
| $F(t)$                   | Fonction cumulative de la RTD                                | s                               |
| $F(V)$                   | Fonction cumulative de la RVD                                | $\text{m}^3$                    |
| $F_V$                    | Fraction volumique de solide                                 | % (volume / volume)             |
| $g$                      | Accélération gravitationnelle                                | $9,8 \text{ m} / \text{s}^2$    |

|            |  |                                      |
|------------|--|--------------------------------------|
| $G$        | Flux de particules                       | m / s                                |
| $\vec{H}$  | Intensité du champ magnétique            | A / m                                |
| $h_{lame}$ | Hauteur de la lame                       | m                                    |
| $I$        | Courant                                  | A                                    |
| $i, j, k$  | Coordonnées spatiales                    | [ ]                                  |
| $j$        | Nombre imaginaire                        | [ ]                                  |
| $K$        | Indice de consistance                    | [ ]                                  |
| $L$        | Longueur d'un réacteur PFR               | m                                    |
| $L$        | Inductance d'une bobine                  | H                                    |
| $l$        | Longueur de la bobine                    | m                                    |
| $L_{lame}$ | Longueur de la lame                      | m                                    |
| $m$        | Masse de la particule                    | kg                                   |
| $M$        | Quantité de traceur                      | g                                    |
| $M_{boue}$ | Masse de boue sèche                      | g                                    |
| $M_0$      | Quantité total de traceur injecté        | g                                    |
| $n$        | Concentration de particule               | nombre de particule / m <sup>3</sup> |
| $N$        | Nombre de réacteur CSTR en série         | [ ]                                  |
| $N$        | Nombre de tours de la bobine d'induction | [ ]                                  |
| $Pe$       | Nombre de Péclet                         | [ ]                                  |
| PFR        | Réacteur à écoulement piston             | [ ]                                  |
| $Q$        | Débit à la sousverse                     | m <sup>3</sup> / s                   |

|                     |   |  |
|---------------------|---|--|
| $Q_{actif}$         | Portion active de l'écoulement                          | $m^3 / s$                              |
| $Q_{boue}$          | Débit volumique de boue déplacé par une lame            | $m^3 / s$                              |
| $Q_{court-circuit}$ | Portion de l'écoulement qui court-circuite l'écoulement | $m^3 / s$                              |
| $Q_{entrée}$        | Débit d'entrée du bilan massique                        | $m^3 / s$                              |
| $Q_{in}$            | Débit à l'entrée du décanteur                           | $m^3 / s$                              |
| $Q_{out}$           | Débit de sortie du décanteur                            | $m^3 / s$                              |
| $Q_{recirculation}$ | Portion de l'écoulement subissant une recirculation     | $m^3 / s$                              |
| $Q_{sortie}$        | Débit de sortie du bilan massique                       | $m^3 / s$                              |
| $Q_{total}$         | Écoulement global du réacteur                           | $m^3 / s$                              |
| $r$                 | Rayon de rotation                                       | $m$                                    |
| $R$                 | Rayon de la bobine d'induction                          | $m$                                    |
| $R$                 | Résistance  | $\Omega$                               |
| RVD                 | Distribution des volumes de résidence                   | $1 / m^3$                              |
| Re                  | Nombre de Reynolds                                      | [ ]                                    |
| RTD                 | Distribution du temps de résidence                      | $s^{-1}$                               |
| RTD (Z)             | RTD avec un débit variable                              | [ ]                                    |
| $S$                 | Section d'un réacteur PFR                               | $m^2$                                  |
| $S$                 | Source  | [ ]                                    |
| $t$                 | Temps   | $s$                                    |
| $T_C$               | Taux de compaction                                      | $\% (\text{poids} / \text{poids}) / s$ |

|               |  |                   |
|---------------|--|-------------------|
| $t_m$         | Temps de résidence moyen mesuré                    | s                 |
| $u, v, w$     | Composantes du vecteur vitesse de l'écoulement     | m / s             |
| $U$           | Vitesse de sédimentation d'une couche de particule | m / s             |
| $V$           | Volume du décanteur                                | m <sup>3</sup>    |
| $V_0$         | Volume de boue initial dans le décanteur           | m <sup>3</sup>    |
| $V_{bobine}$  | Volume de la bobine                                | m <sup>3</sup>    |
| $V_m$         | Volume de résidence moyen mesuré                   | m <sup>3</sup>    |
| $V_{CSTR}$    | Volume associé à un écoulement CSTR                | m <sup>3</sup>    |
| $V_{PFR}$     | Volume associé à un écoulement PFR                 | m <sup>3</sup>    |
| $V_{lame}$    | Vitesse de la lame                                 | m / s             |
| $V_{mort}$    | Volume associé à une zone morte de l'écoulement    | m <sup>3</sup>    |
| $V_r$         | Mesure de la tension                               | Volt              |
| $V_{radiale}$ | Composante radiale de la vitesse                   | m / s             |
| $V_{râteau}$  | Vitesse du râteau                                  | m / s             |
| $v_s$         | Vitesse de sédimentation de la particule           | m / s             |
| $V_{total}$   | Volume total du réacteur                           | m <sup>3</sup>    |
| Vitesse       | Vitesse  | m / s             |
| $Vol$         | Volume de la particule                             | m <sup>3</sup>    |
| W             | Fraction massique du solide                        | % (poids / poids) |
| x, y, z       | Coordonnée spatiale dans le plan cartésien         | [ ]               |

|              |   |          |
|--------------|---|----------|
| $x_i$        | Fraction volumique                                | [ ]      |
| $X_C$        | Réactance d'un condensateur                       | $\Omega$ |
| $X_L$        | Réactance d'une bobine d'induction                | $\Omega$ |
| $Z$          | Variable pour système à débit variable            | [ ]      |
| $Z'$         | Variable pour système à débit et volume variables | [ ]      |
| $Z_{moyen}$  | Valeur moyenne de la courbe $E(Z)$                | [ ]      |
| $Z'_{moyen}$ | Valeur moyenne de la courbe $E(Z')$               | [ ]      |



**Lettres grecques**

|                    |   |   |
|--------------------|---|---|
| $\phi$             | Angle d'attaque de la lame                          | degré °                                     |
| $\gamma$           | Gradient de vitesse ou taux de déformation          | s <sup>-1</sup>                             |
| $\theta$           | Paramètre de normalisation                          | [ ]   |
| $\rho_{fer}$       | Densité de la particule de fer                      | kg / m <sup>3</sup>                         |
| $\rho_{fluide}$    | Densité du fluide                                   | kg / m <sup>3</sup>                         |
| $\rho_{liqueur}$   | Densité de la liqueur Bayer                         | kg / m <sup>3</sup>                         |
| $\rho_{particule}$ | Densité de la particule de boue                     | kg / m <sup>3</sup>                         |
| $\mu$              | Viscosité dynamique du fluide                       | kg / m s                                    |
| $\mu_a$            | Viscosité dynamique apparente                       | kg / m s                                    |
| $\mu_M$            | Perméabilité absolue du matériel                    | H / m                                       |
| $\mu_0$            | Perméabilité relative du vide                       | H / m                                       |
| $\mu_r$            | Perméabilité relative du milieu                     | H / m                                       |
| $\tau$             | Temps de résidence                                  | s   |
| $\tau_{actif}$     | Temps de résidence de la portion active du réacteur | s   |
| $\tau_{CSTR}$      | Temps de résidence du réacteur CSTR                 | s   |
| $\tau_{PFR}$       | Temps de résidence du réacteur PFR                  | s   |
| $\tau_{stress}$    | Contrainte de cisaillement                          | kg / m s <sup>2</sup> ou N / m <sup>2</sup> |
| $\tau_y$           | Contrainte d'écoulement                             | kg / m s <sup>2</sup> ou N / m <sup>2</sup> |

|                   |  |         |
|-------------------|--|---------|
| $\sigma^2$        | Variance   | $s^2$   |
| $\sigma_\theta^2$ | Variance exprimée selon le paramètre normalisation | [ ]     |
| $\omega$          | Vitesse angulaire                                  | rad / s |

## TABLE DES MATIÈRES

|   |             |
|---|-------------|
| <i>RÉSUMÉ</i> .....   | <i>III</i>  |
| <i>REMERCIEMENTS</i> .....  | <i>V</i>    |
| <i>LISTE DES SYMBOLES</i> .....                                       | <i>VI</i>   |
| <i>TABLE DES MATIÈRES</i> .....                                       | <i>XV</i>   |
| <i>LISTE DES FIGURES</i> .....  | <i>XXIV</i> |
| <i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....                                       | <i>XXX</i>  |
| <b>CHAPITRE 1</b> .....   | <b>1</b>    |
| <b>INTRODUCTION</b> .....   | <b>1</b>    |
| 1.1 La problématique .....  | 1           |
| 1.2 Les objectifs.....  | 7           |
| 1.3 Travaux antérieurs et aspects originaux de la recherche .....     | 8           |
| 1.3.1 Principe du traçage et distribution du temps de résidence ..... | 8           |
| 1.3.2 Caractéristiques idéales du traceur.....                        | 9           |
| 1.3.3 Méthode analytique.....   | 10          |
| 1.3.4 Traçage dans le procédé Bayer .....                             | 11          |
| 1.3.4.1 Type de traceurs .....  | 11          |
| 1.3.4.2 Exemple d'essai de traçage .....                              | 13          |
| <b>CHAPITRE 2</b> .....   | <b>18</b>   |
| <b>LE PROCÉDÉ BAYER</b> .....   | <b>18</b>   |
| 2.1 La bauxite .....  | 18          |
| 2.2 Le procédé Bayer .....  | 20          |
| 2.2.1 Broyage de la bauxite.....                                      | 21          |
| 2.2.2 Mélange.....  | 22          |
| 2.2.3 Digestion .....   | 22          |
| 2.2.4 Séparation solide/liquide.....                                  | 25          |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 2.2.5  | Traitement des boues rouges.....                           | 26        |
| 2.2.6  | Filtration.....  | 27        |
| 2.2.7  | Précipitation et séparation de l'hydrate d'aluminium ..... | 28        |
| 2.2.8  | Calcination et traitement du produit.....                  | 30        |
| <b>CHAPITRE 3 .....</b>                                |  | <b>31</b> |
| <b>LES PROCÉDÉS DE SÉPARATION SOLIDE/LIQUIDE .....</b> |  | <b>31</b> |
| 3.1  | La sédimentation.....                                      | 31        |
| 3.1.1  | Sédimentation libre .....                                  | 33        |
| 3.1.2  | Sédimentation par floculation .....                        | 37        |
| 3.1.3  | Sédimentation retardée.....                                | 38        |
| 3.2  | Technique de traitement préliminaire .....                 | 40        |
| 3.2.1  | Stabilité des suspensions colloïdales.....                 | 41        |
| 3.2.2  | Agrégation.....  | 44        |
| 3.2.3  | La coagulation.....  | 44        |
| 3.2.3.1  | <i>Coagulation électrostatique .....</i>                   | <i>45</i> |
| 3.2.3.2  | <i>Coagulation par adsorption .....</i>                    | <i>45</i> |
| 3.2.4  | La floculation .....                                       | 46        |
| 3.2.4.1  | <i>Neutralisation de charges.....</i>                      | <i>47</i> |
| 3.2.4.2  | <i>Pontage inter-particulaire.....</i>                     | <i>47</i> |
| 3.2.4.3  | <i>Étapes de réaction de la floculation.....</i>           | <i>48</i> |
| 3.2.4.4  | <i>Floculation dans le procédé Bayer.....</i>              | <i>49</i> |
| 3.3  | Approche globale de la sédimentation.....                  | 50        |
| 3.3.1  | Équipements de sédimentation.....                          | 50        |
| 3.3.2  | Théorie de sédimentation dans les décanteurs .....         | 51        |
| 3.3.2.1  | <i>Zones de décantation.....</i>                           | <i>53</i> |
| 3.3.2.1.1  | <i>La compaction .....</i>                                 | <i>54</i> |
| 3.3.2.1.1.1  | <i>Facteurs influençant la compaction.....</i>             | <i>56</i> |
| 3.3.3  | Paramètres de conception des décanteurs .....              | 56        |
| 3.3.4  | Décanteurs.....  | 59        |
| 3.3.4.1  | <i>Décanteurs à colonne centrale.....</i>                  | <i>60</i> |
| 3.3.4.2  | <i>Décanteurs à pont surélevé .....</i>                    | <i>61</i> |
| 3.3.4.3  | <i>Décanteur à traction.....</i>                           | <i>61</i> |
| 3.3.4.4  | <i>Décanteurs à caisson.....</i>                           | <i>61</i> |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3.5 Mécanisme de râpeaux.....                                     | 61        |
| 3.3.5.1 Râpeaux à simple tuyau.....                                 | 62        |
| 3.3.5.2 Râpeaux à profil bas.....                                   | 63        |
| 3.3.5.3 Râpeaux à support.....                                      | 64        |
| 3.3.5.4 Râpeaux à balancement « swing lift ».....                   | 64        |
| 3.3.5.5 Piquets d'épaississement.....                               | 64        |
| 3.3.5.6 Action du râpeau sur le transport de la boue.....           | 65        |
| 3.3.6 Propriété des substances en présence.....                     | 68        |
| 3.3.6.1 Liqueur Bayer.....  | 68        |
| 3.3.6.2 Boue rouge.....   | 69        |
| 3.3.6.2.1 Facteurs influençant la rhéologie de la boue rouge .....  | 72        |
| 3.3.6.2.1.1 La concentration solide.....                            | 72        |
| 3.3.6.2.1.2 Distribution granulométrique.....                       | 73        |
| 3.3.6.2.1.3 La floculation .....                                    | 73        |
| <b>CHAPITRE 4.....</b>  | <b>75</b> |
| <b>DISTRIBUTION DU TEMPS DE RÉSIDENCE.....</b>                      | <b>75</b> |
| 4.1 Distribution du temps de résidence.....                         | 75        |
| 4.2 Évaluation de la distribution du temps de résidence.....        | 77        |
| 4.2.1 Injection sous forme de pulse.....                            | 77        |
| 4.2.2 Injection sous forme d'échelon .....                          | 80        |
| 4.3 Caractéristiques de la distribution du temps de résidence ..... | 83        |
| 4.3.1 Relation entre les courbes $E(t)$ et $F(t)$ .....             | 83        |
| 4.3.2 Temps de résidence moyen .....                                | 85        |
| 4.3.3 Variance .....  | 86        |
| 4.3.4 Fonction RTD normalisée, $E(\theta)$ .....                    | 87        |
| 4.3.5 Intégrale de convolution.....                                 | 88        |
| 4.4 RTD des réacteurs idéaux.....                                   | 89        |
| 4.4.1 Réacteur continu parfaitement agité (CSTR).....               | 89        |
| 4.4.2 Réacteur à écoulement piston (PFR).....                       | 91        |
| 4.5 Diagnostic et problèmes opérationnels .....                     | 92        |
| 4.5.1 Modèle compartimenté .....                                    | 92        |
| 4.5.1.1 CSTR.....   | 93        |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 4.5.1.1.1 | Conditions d'opération idéales .....   | 93  |
| 4.5.1.1.2 | Cheminement préférentiel ou court-circuit.....   | 94  |
| 4.5.1.1.3 | Volume mort.....   | 95  |
| 4.5.1.2   | <i>PFR</i> .....   | 96  |
| 4.5.1.2.1 | Conditions d'opération idéales .....   | 96  |
| 4.5.1.2.2 | Cheminement préférentiel ou court-circuit.....   | 96  |
| 4.5.1.2.3 | Volume mort.....   | 97  |
| 4.5.1.3   | <i>PFR et CSTR en série</i> .....  | 98  |
| 4.5.1.4   | <i>Recirculation dans un réacteur</i> .....  | 99  |
| 4.5.1.5   | <i>Exemple de diagnostic</i> .....   | 100 |
| 4.6       | Réacteurs non-idéals .....   | 102 |
| 4.6.1     | Modèle des réservoirs en série .....   | 102 |
| 4.6.2     | Modèle de dispersion .....   | 104 |
| 4.7       | RTD des procédés à débit et volume variables.....                                      | 107 |
| 4.7.1     | Système à volume constant et débit variable .....                                      | 109 |
| 4.7.1.1   | <i>Injection sous forme de pulse</i> .....   | 109 |
| 4.7.1.2   | <i>Injection sous forme d'échelon</i> .....  | 111 |
| 4.7.1.3   | <i>Relation entre les courbes <math>E(V)</math> et <math>F(V)</math></i> .....         | 111 |
| 4.7.1.4   | <i>Volume de résidence moyen</i> .....   | 111 |
| 4.7.1.5   | <i>Variance</i> .....  | 112 |
| 4.7.1.6   | <i>Fonction RVD normalisée, <math>E(Z)</math></i> .....                                | 113 |
| 4.7.1.6.1 | <i>Z moyen</i> .....   | 114 |
| 4.7.1.6.2 | <i>Relation entre la courbe <math>C(Z)</math> et la courbe <math>E(Z)</math></i> ..... | 114 |
| 4.7.1.7   | <i>Intégrale de convolution</i> .....  | 115 |
| 4.7.1.8   | <i>Réacteurs idéaux</i> .....  | 116 |
| 4.7.1.8.1 | <i>Réacteur continu parfaitement agité (CSTR)</i> .....                                | 116 |
| 4.7.1.8.2 | <i>Réacteur à écoulement piston (PFR)</i> .....  | 116 |
| 4.7.1.9   | <i>PFR et CSTR en série</i> .....  | 117 |
| 4.7.1.10  | <i>Modèle des réservoirs en séries</i> .....   | 117 |
| 4.7.2     | Système à volume et débit variable.....  | 117 |
| 4.7.2.1   | <i>Réacteur continu parfaitement agité</i> .....                                       | 119 |
| 4.7.2.2   | <i>Réacteur à écoulement piston</i> .....  | 119 |

|                                   |   |            |
|-----------------------------------|---|------------|
| 4.7.2.3                           | <i>Modèle des réservoirs en série</i> .....               | 120        |
| 4.8                               | Approche expérimentale .....                              | 120        |
| 4.8.1                             | Essais expérimentaux .....                                | 121        |
| 4.8.2                             | Modèles d'équations .....                                 | 122        |
| 4.8.3                             | Simulations numériques .....                              | 123        |
| <b>CHAPITRE 5</b>                 | .....   | <b>126</b> |
| <b>MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE</b> | .....   | <b>126</b> |
| 5.1                               | Traceur .....   | 127        |
| 5.1.1                             | Type de traceur .....                                     | 127        |
| 5.1.2                             | Caractéristiques idéales du traceur .....                 | 128        |
| 5.1.3                             | Type de traceur utilisé .....                             | 129        |
| 5.1.4                             | Caractéristiques physiques du traceur .....               | 131        |
| 5.2                               | Méthode de détection ferromagnétique .....                | 133        |
| 5.2.1                             | Principe de fonctionnement .....                          | 133        |
| 5.2.2                             | Rappels théoriques .....                                  | 134        |
| 5.2.2.1                           | <i>Bobine d'induction</i> .....                           | 135        |
| 5.2.2.1.1                         | Perméabilité relative du fer .....                        | 136        |
| 5.2.3                             | Première version de l'appareil de mesure du fer .....     | 139        |
| 5.2.3.1                           | <i>Branche de référence</i> .....                         | 140        |
| 5.2.4                             | Deuxième version de l'appareil de mesure du fer .....     | 141        |
| 5.2.4.1                           | <i>Délai d'échantillonnage</i> .....                      | 145        |
| 5.2.4.2                           | <i>Calibration de l'appareil de mesure</i> .....          | 145        |
| 5.2.4.2.1                         | Limite de détection .....                                 | 146        |
| 5.2.4.2.1.1                       | <i>Échantillons</i> .....                                 | 146        |
| 5.2.4.2.1.2                       | <i>Circuit de recirculation</i> .....                     | 150        |
| 5.2.4.2.2                         | Reproductibilité .....                                    | 151        |
| 5.2.4.2.2.1                       | <i>Échantillons</i> .....                                 | 151        |
| 5.2.4.2.2.2                       | <i>Circuit de recirculation</i> .....                     | 152        |
| 5.2.4.2.3                         | Facteurs physiques influençant l'appareil de mesure ..... | 153        |
| 5.2.4.2.3.1                       | <i>Volume de boue</i> .....                               | 153        |
| 5.2.4.2.3.2                       | <i>Type de boue</i> .....                                 | 155        |
| 5.2.4.2.3.3                       | <i>Concentration solide de la boue</i> .....              | 155        |

|                                |  |            |
|--------------------------------|--|------------|
| 5.2.4.2.3.4                    | <i>Débits</i> .....                                  | 157        |
| 5.2.4.2.3.5                    | <i>Vibrations</i> .....                              | 158        |
| 5.3                            | Montage expérimental .....                           | 158        |
| 5.3.1                          | Décanteur à échelle réduite .....                    | 159        |
| 5.3.2                          | Le râteau .....                                      | 161        |
| 5.3.2.1                        | <i>Géométrie</i> .....                               | 161        |
| 5.3.2.2                        | <i>Couplemètre</i> .....                             | 163        |
| 5.4                            | Protocole expérimental .....                         | 164        |
| 5.5                            | Variables .....                                      | 166        |
| 5.5.1                          | Quantité de traceur injecté .....                    | 166        |
| 5.5.2                          | Modes d'injection du traceur de fer .....            | 166        |
| 5.5.3                          | Types d'injection du traceur de fer .....            | 168        |
| 5.5.4                          | Forme et emplacement du puits d'alimentation .....   | 168        |
| 5.5.5                          | Râteau .....   | 170        |
| 5.5.6                          | Conditions d'opérations .....                        | 171        |
| 5.5.6.1                        | <i>Hauteur du lit de boue</i> .....                  | 171        |
| 5.5.6.2                        | <i>Débits</i> .....                                  | 171        |
| 5.5.6.3                        | <i>La floculation</i> .....                          | 171        |
| 5.5.6.3.1                      | Type de floculant .....                              | 172        |
| 5.5.6.3.2                      | Concentration de la solution de floculant .....      | 172        |
| 5.5.6.3.3                      | Dosage .....   | 173        |
| 5.5.7                          | Simulation de problèmes .....                        | 173        |
| 5.6                            | Paramètres expérimentaux .....                       | 174        |
| 5.6.1                          | Concentration de la liqueur Bayer .....              | 174        |
| 5.6.2                          | Concentration de la suspension de boues rouges ..... | 174        |
| 5.7                            | Mesures .....  | 175        |
| 5.7.1                          | Débits .....   | 176        |
| 5.7.2                          | Concentration solide de l'alimentation .....         | 177        |
| 5.7.3                          | Concentration solide de la boue de sousverse .....   | 178        |
| 5.7.4                          | Vitesse de sédimentation .....                       | 178        |
| <b>CHAPITRE 6</b>              | .....  | <b>179</b> |
| <b>RÉSULTATS ET DISCUSSION</b> | .....  | <b>179</b> |
| 6.1                            | Présentation des résultats .....                     | 180        |



|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 6.1.1   | Traitement préliminaire.....                           | 180 |
| 6.1.1.1 | <i>Recalage</i> .....                                  | 180 |
| 6.1.1.2 | <i>Lissage des courbes de RTD</i> .....                | 181 |
| 6.1.1.3 | <i>Recentrage</i> .....                                | 182 |
| 6.1.1.4 | <i>Conversion de la courbe Delta Fréquence</i> .....   | 183 |
| 6.1.1.5 | <i>Extrapolation de la traînée</i> .....               | 184 |
| 6.1.2   | Obtention de la courbe RTD ou E(t).....                | 185 |
| 6.1.3   | Obtention de la courbe E( $\theta$ ).....              | 186 |
| 6.1.4   | RTD des systèmes à débit variable .....                | 187 |
| 6.1.4.1 | <i>Calcul de Z moyen</i> .....                         | 192 |
| 6.2     | Méthode d'analyse.....                                 | 192 |
| 6.2.1   | Modélisation de la RTD.....                            | 194 |
| 6.2.1.1 | <i>Nombre de pics de la courbe</i> .....               | 194 |
| 6.2.1.2 | <i>Écart entre l'origine et la courbe de RTD</i> ..... | 195 |
| 6.2.1.3 | <i>Symétrie des courbes</i> .....                      | 195 |
| 6.2.1.4 | <i>Épaulements précoces de la courbe</i> .....         | 196 |
| 6.2.1.5 | <i>Épaulements tardifs de la courbe</i> .....          | 196 |
| 6.2.1.6 | <i>Traînée ou queue de la courbe</i> .....             | 196 |
| 6.2.2   | Programme Analyse RTD.....                             | 197 |
| 6.2.2.1 | <i>Exemple de simulation</i> .....                     | 198 |
| 6.2.3   | Décomposition des courbes .....                        | 200 |
| 6.2.3.1 | <i>Étapes de décomposition</i> .....                   | 205 |
| 6.2.3.2 | <i>Emplacement des zones d'écoulement</i> .....        | 211 |
| 6.3     | Reproductibilité des essais de traçage .....           | 215 |
| 6.3.1   | Premier type de boue.....                              | 216 |
| 6.3.2   | Deuxième type de boue.....                             | 224 |
| 6.4     | Variables influençant la RTD .....                     | 229 |
| 6.4.1   | Floculation de la poudre de fer .....                  | 230 |
| 6.4.2   | Type de puits d'alimentation.....                      | 232 |
| 6.4.3   | Hauteur de l'alimentation.....                         | 234 |
| 6.4.4   | Emplacement de l'alimentation .....                    | 236 |
| 6.4.4.1 | <i>Alimentation près du centre</i> .....               | 237 |
| 6.4.4.2 | <i>Alimentation près de la paroi</i> .....             | 239 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| 6.4.4.3      | <i>Alimentation près de la zone milieu (à mi-rayon)</i> .....          | 240 |
| 6.4.4.4      | <i>Alimentation près de la zone milieu (à mi-rayon) à 180°</i> .....   | 241 |
| 6.4.5        | <i>Injections localisées</i> .....                                     | 243 |
| 6.4.5.1      | <i>Injections localisées au centre (<math>r = 0</math>)</i> .....      | 243 |
| 6.4.5.2      | <i>Injections localisées à mi-rayon (<math>r = 0,5 r</math>)</i> ..... | 249 |
| 6.4.5.3      | <i>Injections localisées à <math>r = r</math></i> .....                | 253 |
| 6.4.5.4      | <i>Injections localisées à 180 degrés</i> .....                        | 256 |
| 6.4.5.5      | <i>Court-circuit dans la zone de <math>0,5 r</math></i> .....          | 259 |
| 6.4.6        | <i>Injections circulaires</i> .....                                    | 262 |
| 6.4.7        | <i>Dispersion uniforme</i> .....                                       | 264 |
| 6.4.8        | <i>Vitesse de rotation du râteau</i> .....                             | 266 |
| 6.4.8.1      | <i>Vitesse plus lente</i> .....  | 267 |
| 6.4.8.2      | <i>Vitesse plus rapide</i> .....                                       | 270 |
| 6.4.9        | <i>Conditions d'opération</i> .....                                    | 273 |
| 6.4.9.1      | <i>Niveau de boue</i> .....  | 273 |
| 6.4.9.1.1    | <i>Bas niveau</i> .....  | 274 |
| 6.4.9.1.2    | <i>Haut niveau</i> .....   | 277 |
| 6.4.9.2      | <i>Débit à la sousverse</i> .....                                      | 280 |
| 6.4.9.3      | <i>Floculation</i> .....   | 282 |
| 6.4.10       | <i>Simulation de problèmes</i> .....                                   | 285 |
| 6.4.10.1     | <i>Court-circuit dans l'écoulement</i> .....                           | 286 |
| 6.4.10.1.1   | <i>Court-circuit complet</i> .....                                     | 286 |
| 6.4.10.1.2   | <i>Demi court-circuit</i> .....  | 290 |
| 6.4.10.2     | <i>Volume mort</i> .....   | 291 |
| 6.4.10.2.1   | <i>Volume mort près du centre</i> .....                                | 291 |
| 6.4.10.2.2   | <i>Volume mort à mi-rayon</i> .....                                    | 295 |
| 6.4.10.2.3   | <i>Volume mort près de la paroi</i> .....                              | 298 |
| 6.4.10.3     | <i>Les râteaux</i> .....   | 301 |
| 6.4.10.3.1   | <i>Détection du râteau</i> .....                                       | 302 |
| 6.4.10.3.1.1 | <i>Surdose de fer</i> .....  | 303 |
| 6.4.10.3.1.2 | <i>Déplacement du puits de sousverse</i> .....                         | 303 |
| 6.4.10.3.2   | <i>Obstruction partielle des lames</i> .....                           | 304 |
| 6.4.10.3.3   | <i>Obstruction complète des lames « gratte »</i> .....                 | 307 |

|                            |   |            |
|----------------------------|---|------------|
| 6.4.10.3.4                 | Obstruction complète des lames et de la structure ..... | 311        |
| 6.4.10.3.5                 | Obstruction complète du lit de boue.....                | 314        |
| <b>CONCLUSION .....</b>    |   | <b>316</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b> |   | <b>325</b> |
| <b>ANNEXE A .....</b>      |   | <b>341</b> |
| <b>BOUE ROUGE.....</b>     |   | <b>341</b> |
| A.1                        | Composition chimique.....                               | 341        |
| A.2                        | Granulométrie .....                                     | 341        |
| <b>ANNEXE B.....</b>       |   | <b>344</b> |
| <b>LE RÂTEAU .....</b>     |   | <b>344</b> |
| B.1                        | Transport de la boue .....                              | 344        |
| B.2                        | Bilan massique d'un volume élémentaire annulaire.....   | 345        |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1.1 – Schéma du procédé Bayer .....  | 3  |
| Figure 1.2 – Courbe de temps de résidence .....   | 15 |
| Figure 2.1 – Minerai de bauxite.....  | 19 |
| Figure 2.2 – Broyage de la bauxite.....   | 21 |
| Figure 2.3 – Schéma du mélange de la bauxite, de la chaux et de la liqueur usée .....   | 22 |
| Figure 2.4 – Schéma de la digestion.....  | 23 |
| Figure 2.5 – Schéma de la séparation solide/liquide .....                               | 25 |
| Figure 2.6 – Schéma de l'étape de filtration.....                                       | 27 |
| Figure 2.7 – Schéma de l'étape de précipitation.....                                    | 29 |
| Figure 3.1 – Forces influençant la vitesse de sédimentation d'une particule .....       | 33 |
| Figure 3.2 – Schéma des phases de sédimentation en test du cylindre.....                | 39 |
| Figure 3.3 – Rencontre de deux particules de même charge .....                          | 42 |
| Figure 3.4 – Stabilité d'une suspension colloïdale .....                                | 43 |
| Figure 3.5 – Mécanismes de collisions des particules.....                               | 44 |
| Figure 3.6 – Floculation par pontage et par neutralisation de charges « mosaïque »..... | 46 |
| Figure 3.7 – Étapes de la floculation .....   | 48 |
| Figure 3.8 – Classification des types de sédimentation.....                             | 51 |
| Figure 3.9 – Zones de sédimentation dans un décanteur idéal .....                       | 54 |
| Figure 3.10 – Décanteur à colonne centrale .....  | 60 |
| Figure 3.11 – Râteau à simple tuyau .....   | 63 |
| Figure 3.12 – Râteau à profil bas.....  | 63 |
| Figure 3.13 – Trajectoires de la boue dans le lit de boue .....                         | 68 |
| Figure 3.14 – Courbes d'écoulement pour différents types de matériels .....             | 71 |
| Figure 4.1 – Type d'injection de traceurs.....  | 77 |
| Figure 4.2 – Injection sous forme de pulse et courbe $C(t)$ .....                       | 78 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 4.3 – Transformation d’une courbe $C(t)$ en courbe RTD .....                                     | 80  |
| Figure 4.4 – Injection sous forme échelon et courbe $C(t)$ échelon .....                                | 81  |
| Figure 4.5 – Transformation de la courbe $C(t)_{\text{échelon}}$ en courbe $F(t)$ adimensionnelle ..... | 82  |
| Figure 4.6 – Relation entre la courbe $E(t)$ et $F(t)$ .....  | 84  |
| Figure 4.7 – Transformation de la courbe $E(t)$ en courbe $E(\theta)$ normalisée .....                  | 87  |
| Figure 4.8 – Exemple d’intégrale de convolution .....   | 89  |
| Figure 4.9 – Courbes $E(t)$ et $E(\theta)$ pour un CSTR .....   | 91  |
| Figure 4.10 – Courbes $E(t)$ et $E(\theta)$ pour un PFR .....   | 92  |
| Figure 4.11 – Conditions d’opération idéales d’un CSTR .....  | 94  |
| Figure 4.12 – CSTR idéal avec un court-circuit .....  | 95  |
| Figure 4.13 – CSTR idéal avec un volume mort .....  | 95  |
| Figure 4.14 – Conditions d’opération idéales d’un PFR .....   | 96  |
| Figure 4.15 – PFR idéal avec un court-circuit .....   | 97  |
| Figure 4.16 – PFR idéal avec une zone morte .....   | 97  |
| Figure 4.17 – Réacteur modélisé à l’aide d’un CSTR en série avec un PFR .....                           | 98  |
| Figure 4.18 – Courbe $E(t)$ pour un CSTR et un PFR en série .....                                       | 99  |
| Figure 4.19 – Problématique rencontrée dans un réacteur CSTR .....                                      | 101 |
| Figure 4.20 – Problématique rencontrée dans un réacteur PFR .....                                       | 101 |
| Figure 4.21 – Courbes RTD pour le modèle des réservoirs en série .....                                  | 103 |
| Figure 4.22 – Caractéristiques de la courbe $E(\theta)$ du modèle des réservoirs en série .....         | 104 |
| Figure 4.23 – Relation entre le terme $D/uL$ et la courbe $E(\theta)$ .....                             | 105 |
| Figure 4.24 – Courbes $E(\theta)$ obtenues pour des dispersions importantes .....                       | 107 |
| Figure 4.25 – Courbe $C(t)$ ou $C(Z)$ pour un même essai de traçage .....                               | 115 |
| Figure 5.1 – Granulométrie de la poudre de fer .....  | 132 |
| Figure 5.2 – Influence d’une particule de fer dans un champ magnétique uniforme .....                   | 134 |
| Figure 5.3 – Bobine d’induction et lignes de champ magnétique .....                                     | 135 |
| Figure 5.4 – Densité du champ magnétique dans l’air et le fer .....                                     | 136 |
| Figure 5.5 – Courbe d’aimantation du fer .....  | 138 |
| Figure 5.6 – Circuit RL de la première version de l’appareil de mesure du fer .....                     | 139 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 5.7 – Schéma de la source .....  | 140 |
| Figure 5.8 – Circuit LC de l'appareil de mesure du fer.....                                 | 142 |
| Figure 5.9 – Bobine de mesure et bobine de référence.....                                   | 144 |
| Figure 5.10 – Appareil de mesure et source de l'appareil de mesure.....                     | 144 |
| Figure 5.11 – Circuit de recirculation d'une suspension de boue rouge .....                 | 146 |
| Figure 5.12 – Courbe de calibration pour des échantillons de fer/farine.....                | 148 |
| Figure 5.13 – Courbe de calibration pour des échantillons de fer/boue rouge .....           | 149 |
| Figure 5.14 – Courbe de calibration pour un circuit de recirculation de la boue rouge ..... | 151 |
| Figure 5.15 – Reproductibilité des essais de recirculation de la boue rouge.....            | 152 |
| Figure 5.16 – Influence du volume de boue rouge sur les courbes de calibration .....        | 154 |
| Figure 5.17 – Courbes de calibration pour deux types de boue rouge .....                    | 155 |
| Figure 5.18 – Influence de la concentration solide sur les courbes de calibration .....     | 156 |
| Figure 5.19 – Plateforme du montage expérimental.....                                       | 159 |
| Figure 5.20 – Décanteur à échelle réduite .....   | 161 |
| Figure 5.21 – Râteau du décanteur à échelle réduite.....                                    | 163 |
| Figure 5.22 – Schéma d'un montage expérimental lors d'un essai .....                        | 165 |
| Figure 5.23 – Système d'injection du traceur de fer dans la ligne d'alimentation .....      | 167 |
| Figure 5.24 – Emplacement des zones pour des injections localisées et circulaires .....     | 168 |
| Figure 5.25 – Puits d'alimentation.....   | 169 |
| Figure 5.26 – Emplacements possibles des puits d'alimentation .....                         | 170 |
| Figure 5.27 – Courbes de calibration de la pompe de sousverse.....                          | 177 |
| Figure 6.1 – Recalage de la courbe Delta Fréquence .....                                    | 181 |
| Figure 6.2 – Lissage de la courbe Delta Fréquence.....                                      | 182 |
| Figure 6.3 – Recentrage de la courbe Delta Fréquence .....                                  | 183 |
| Figure 6.4 – Conversion de la courbe Delta Fréquence.....                                   | 184 |
| Figure 6.5 – Courbe RTD d'un essai expérimental .....                                       | 186 |
| Figure 6.6 – Courbe $E(\theta)$ d'un essai expérimental .....                               | 187 |
| Figure 6.7 – Valves d'échantillonnage du lit de boue .....                                  | 190 |
| Figure 6.8 – Courbe $E(Z)$ d'un essai expérimental.....                                     | 191 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 6.9 – Simulation d’une courbe RTD .....   | 199 |
| Figure 6.10 – Exemple de décomposition de pic.....   | 203 |
| Figure 6.11 – Décomposition de courbes RTD .....   | 204 |
| Figure 6.12 – Simulation à l’aide du modèle des réservoirs en série .....                                      | 205 |
| Figure 6.13 – Décomposition du premier pic .....   | 206 |
| Figure 6.14 – Courbe E(Z) résiduelle de 1 <sup>er</sup> ordre et décomposition du second pic .....             | 207 |
| Figure 6.15 – Courbe E(Z) résiduelle de 2 <sup>e</sup> ordre et décomposition du troisième pic .....           | 208 |
| Figure 6.16 – Courbe E(Z) résiduelle de 3 <sup>e</sup> ordre et décomposition des pics quatre et cinq<br>..... | 210 |
| Figure 6.17 – Décomposition de l’écoulement global.....  | 211 |
| Figure 6.18 – Zone d’écoulement PFR dans le décanteur expérimental .....                                       | 212 |
| Figure 6.19 – Écoulement de la boue dans la portion conique du décanteur .....                                 | 214 |
| Figure 6.20 – Reproductibilité du couple appliqué au râteau .....  | 218 |
| Figure 6.21 – Reproductibilité des courbes E(t), boue # 1 .....  | 220 |
| Figure 6.22 – Reproductibilité des courbes E(Z), boue # 1 .....  | 221 |
| Figure 6.23 – Reproductibilité des courbes E(t), boue # 2 .....  | 226 |
| Figure 6.24 – Reproductibilité des courbes E(Z), boue # 2.....   | 227 |
| Figure 6.25 – Influence de la floculation du fer sur l’écoulement global.....                                  | 231 |
| Figure 6.26 – Reproductibilité des courbes E(Z) utilisant un puits d’alimentation.....                         | 233 |
| Figure 6.27 – Influence de la hauteur de l’alimentation.....   | 234 |
| Figure 6.28 – Courbes E(Z) pour des variations d’emplacements de l’alimentation .....                          | 236 |
| Figure 6.29 – Influence de l’alimentation près du centre .....   | 238 |
| Figure 6.30 – Influence de l’alimentation près de la paroi .....   | 240 |
| Figure 6.31 – Influence de l’alimentation à mi-parcours .....  | 241 |
| Figure 6.32 – Courbes E(Z) pour une alimentation à 0,5 r à 180° .....  | 242 |
| Figure 6.33 – Injection localisée au centre du décanteur.....  | 244 |
| Figure 6.34 – Courbes E(Z) pour des injections localisées à r = 0 .....  | 245 |
| Figure 6.35 – Décalage de la courbe d’écoulement global.....   | 246 |
| Figure 6.36 – Écoulement de la boue dans la portion conique du décanteur à r = 0 .....                         | 247 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 6.37 – Exemple de décalage des courbes pour comparer les premiers pics de<br>décomposition ..... | 248 |
| Figure 6.38 – Injection localisée à $r = 0,5 r$ .....   | 249 |
| Figure 6.39 – Courbes $E(Z)$ pour des injections localisées à $r = 0,5 r$ .....                         | 250 |
| Figure 6.40 – Écoulement de la boue dans la portion conique du décanteur à $0,5 r$ .....                | 253 |
| Figure 6.41 – Injection localisée à $r = r$ .....   | 254 |
| Figure 6.42 – Courbe $E(Z)$ d'une injection localisée à $r = r$ .....                                   | 255 |
| Figure 6.43 – Écoulement de la boue dans la portion conique du décanteur à $r$ .....                    | 256 |
| Figure 6.44 – Injection localisée à 180 degrés de l'alimentation .....                                  | 257 |
| Figure 6.45 – Courbes $E(Z)$ pour des injections localisées à 180 degrés de l'alimentation<br>.....     | 258 |
| Figure 6.46 – Alimentation et injection localisée à $0,5 r$ à 180 degrés .....                          | 260 |
| Figure 6.47 – Influence de l'alimentation pour une injection localisée à $0,5 r$ .....                  | 261 |
| Figure 6.48 – Courbes $E(Z)$ pour trois injections circulaires .....                                    | 263 |
| Figure 6.49 – Dispersion uniforme .....   | 264 |
| Figure 6.50 – Courbe $E(Z)$ d'une dispersion uniforme .....   | 265 |
| Figure 6.51 – Courbe $E(Z)$ pour une vitesse de rotation plus lente .....                               | 267 |
| Figure 6.52 – Courbe $E(Z)$ pour une vitesse de rotation plus rapide .....                              | 271 |
| Figure 6.53 – Courbes $E(t)$ pour des variations de la hauteur du niveau de boue .....                  | 275 |
| Figure 6.54 – Courbe $E(Z)$ pour un bas niveau de boue .....  | 276 |
| Figure 6.55 – Courbe $E(Z)$ pour un niveau de boue plus élevé .....                                     | 278 |
| Figure 6.56 – Courbe $E(Z)$ pour une variation de débit à la sousverse .....                            | 280 |
| Figure 6.57 – Courbes $E(Z)$ pour des variations de dosage .....  | 282 |
| Figure 6.58 – Court-circuit complet du lit de boue .....  | 287 |
| Figure 6.59 – Court-circuit complet du lit de boue .....  | 288 |
| Figure 6.60 – Courbes $E(t)$ de court-circuit de l'écoulement .....                                     | 289 |
| Figure 6.61 – Demi court-circuit .....  | 290 |
| Figure 6.62 – Volume mort au centre du décanteur .....  | 292 |
| Figure 6.63 – Écoulement de la boue avec un volume mort à $r = 0$ .....                                 | 292 |



|   |     |
|---|-----|
| Figure 6.64 – Courbe $E(Z)$ pour un volume mort près du centre .....                      | 293 |
| Figure 6.65 – Volume mort à mi-rayon .....  | 295 |
| Figure 6.66 – Écoulement de la boue avec une zone morte à $0,5 r$ .....                   | 296 |
| Figure 6.67 – Courbe $E(Z)$ d'un écoulement avec une zone morte à $0,5 r$ .....           | 297 |
| Figure 6.68 – Volume mort près de la paroi .....  | 299 |
| Figure 6.69 – Écoulement de la boue avec une zone morte à $r = r$ .....                   | 299 |
| Figure 6.70 – Courbe $E(Z)$ d'un écoulement avec volume mort à $r$ .....                  | 300 |
| Figure 6.71 – RTD d'un essai de traçage dans un décanteur industriel .....                | 303 |
| Figure 6.72 – Obstruction partielle des lames .....                                       | 305 |
| Figure 6.73 – Courbe $E(Z)$ pour une obstruction partielle des lames .....                | 306 |
| Figure 6.74 – Obstruction complète des lames .....  | 308 |
| Figure 6.75 – Courbe RTD pour une obstruction complète des lames .....                    | 309 |
| Figure 6.76 – Obstruction complète des lames et de la structure .....                     | 311 |
| Figure 6.77 – Courbe $E(Z)$ d'une obstruction complète des lames et de la structure ..... | 312 |
| Figure 6.78 – Obstruction complète du lit de boue .....                                   | 314 |
| Figure 6.79 – Courbe $E(Z)$ d'une obstruction complète du lit de boue .....               | 315 |
| Figure A.1 – Distribution granulométrique de la boue rouge # 1 .....                      | 342 |
| Figure A.2 – Distribution granulométrique de la boue rouge # 2 .....                      | 342 |
| Figure B.1 – Bilan massique sur une lame de râteau .....                                  | 346 |

## LISTE DES TABLEAUX

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 1.1 – Revue littéraire d’essais de traçage dans des décanteurs .....                    | 6   |
| Tableau 2.1 – Composition minéralogique des bauxites (composants majeurs).....                  | 20  |
| Tableau 3.1 – Propriétés physiques de la liqueur Bayer au dernier stage de lavage .....         | 69  |
| Tableau 3.2 – Propriétés physiques de la boue rouge non floculée.....                           | 74  |
| Tableau 3.3 – Propriétés physiques de la boue rouge floculée.....                               | 74  |
| Tableau 4.1 – Revue littéraire d’essais de traçage expérimentaux .....                          | 121 |
| Tableau 4.2 – Revue littéraire de différents systèmes d’équations développés .....              | 123 |
| Tableau 4.3 – Revue littéraire de différents modèles de simulation développés.....              | 125 |
| Tableau 6.1 – Mesures expérimentales et écart-type des essais de calibration, boue # 1...217    |     |
| Tableau 6.2 – Nombre de CSTR utilisés pour simuler l’écoulement, boue # 1 .....                 | 223 |
| Tableau 6.3 – $Z_{\text{moyen}}$ spécifique de chacun des pics, boue # 1 .....                  | 223 |
| Tableau 6.4 – Aire spécifique de chacun des pics, boue # 1 .....                                | 223 |
| Tableau 6.5 – Mesures expérimentales et écart-type des essais de calibration, boue # 2...225    |     |
| Tableau 6.6 – Nombre de CSTR utilisés pour simuler l’écoulement, boue # 2 .....                 | 228 |
| Tableau 6.7 – $Z_{\text{moyen}}$ spécifique de chacun des pics, boue # 2.....                   | 229 |
| Tableau 6.8 – Aire spécifique de chacun des pics, boue # 2 .....                                | 229 |
| Tableau 6.9 – Paramètres de décomposition des courbes de floculation du fer .....               | 231 |
| Tableau 6.10 – Paramètres de décomposition des courbes de hauteur de l’alimentation...235       |     |
| Tableau 6.11 – Paramètres de décomposition des courbes d’emplacement de l’alimentation<br>..... | 239 |
| Tableau 6.12 – Paramètres de décomposition des courbes d’alimentation à 0,5 r .....             | 242 |
| Tableau 6.13 – Paramètres de décomposition des courbes d’injection localisée à $r = 0$ ....     | 248 |
| Tableau 6.14 – Paramètres de décomposition des courbes d’injection localisée à 0,5 r ....       | 251 |
| Tableau 6.15 – Paramètres de décomposition de la courbe d’injection localisée à $r$ .....       | 255 |

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 6.16 – Paramètres de décomposition des courbes d'injection localisée à 180 ° ...   | 259 |
| Tableau 6.17 – Décomposition d'injection localisée à 0,5 r et d'alimentation opposée ....  | 261 |
| Tableau 6.18 – Paramètres de décomposition de la dispersion uniforme.....  | 266 |
| Tableau 6.19 – Comparaison des temps d'apparition des pics de décomposition 1, 2 et 3<br>pour une vitesse de rotation plus lente .....                 | 269 |
| Tableau 6.20 – Comparaison des valeurs d'apparition des pics de décomposition 1, 2 et 3<br>pour une vitesse de rotation plus lente selon l'axe Z ..... | 269 |
| Tableau 6.21 – Paramètres de décomposition pour une vitesse de rotation plus lente.....  | 270 |
| Tableau 6.22 – Paramètres de décomposition pour une vitesse de rotation plus rapide ....   | 273 |
| Tableau 6.23 – Paramètres de décomposition des courbes pour un bas niveau de boue....  | 277 |
| Tableau 6.24 – Paramètre de décomposition des courbes pour un haut niveau de boue....  | 279 |
| Tableau 6.25 – Paramètre de décomposition pour une variation de débit.....   | 281 |
| Tableau 6.26 – Paramètre de décomposition pour une variation de dosage.....  | 283 |
| Tableau 6.27– Paramètres de décomposition d'un volume mort à $r = 0$ .....   | 294 |
| Tableau 6.28 – Paramètres de décomposition d'un volume mort à 0,5 r .....  | 298 |
| Tableau 6.29 – Paramètres de décomposition pour un volume mort près de la paroi .....  | 301 |
| Tableau 6.30 – Paramètres de décomposition pour une obstruction partielle des lames ...  | 307 |
| Tableau 6.31 – Paramètres de décomposition pour une obstruction complète des lames ..  | 311 |
| Tableau 6.32 – Paramètres de décomposition de l'obstruction complète des lames et de la<br>structure.....  | 313 |
| Tableau A.1 – Composition chimique typique de la boue rouge .....  | 343 |

# **CHAPITRE 1**

## **INTRODUCTION**

Dans l'histoire de la métallurgie, la découverte de l'aluminium est assez récente. Ce métal fut isolé pour la première fois en 1825 par une réaction chimique produisant un amalgame avec le potassium. L'apparition de l'aluminium a engendré une multitude d'innovations, tant au niveau du procédé de sa fabrication qu'à l'utilisation qui en découle (emballages alimentaires, machinerie, transport, construction, aérospatial, etc.). Ainsi, depuis le début du siècle, l'industrie mondiale de l'aluminium connaît un développement d'une ampleur sans précédent dans l'histoire des métaux. À titre d'exemple, la production canadienne d'aluminium est passée de 7 300 tonnes métriques à 2 700 000 tonnes entre 1901 et 2001. Étant donné la demande croissante et les coûts associés au procédé, les industries métallurgiques s'efforcent d'améliorer le procédé de fabrication de l'aluminium.

### **1.1 La problématique**

L'aluminium est l'un des éléments métalliques le plus abondant dans le monde. Il constitue environ 8 % de la croûte terrestre et se présente généralement sous forme d'oxydes. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour l'obtention de l'alumine, composé

intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. Ce minerai provenant des régions tropicales est facile à extraire mais sa transformation en aluminium métallique s'avère assez complexe.

Dans le cadre de la production d'aluminium, les industries minières, telles que la compagnie Rio-Tinto-Alcan, utilisent le procédé Bayer pour extraire l'alumine contenue dans la bauxite. Ce procédé, inventé en 1887 par Karl-Joseph Bayer, est essentiellement composé de cinq grandes étapes (Figure 1.1). La première étape de ce procédé consiste au broyage de la bauxite. S'ensuit l'étape de digestion où la bauxite broyée est mélangée à une solution de soude caustique communément appelée liqueur Bayer. Ainsi, sous des conditions spécifiques de température et de pression, l'oxyde d'aluminium est solubilisé dans la liqueur Bayer sous forme d'aluminate de sodium tandis que les impuretés demeurent majoritairement à l'état solide. Ces résidus solides, communément appelés boues rouges, contiennent principalement des oxydes de fer, de silicium et de titane. La décantation (séparation des solides en suspension par gravité) permet de retirer les résidus solides de la liqueur contenant l'aluminate. Mentionnons également que l'utilisation d'agents de floculation permet d'accélérer l'étape de décantation en augmentant considérablement la vitesse de sédimentation des particules.

Par la suite, la boue est lavée et acheminée vers des sites d'empilement. La liqueur surnageante contenant l'aluminate de sodium est pompée et filtrée afin de retirer les matières particulaires résiduelles en suspension. L'aluminate de sodium est ensuite

précipité sous forme de cristaux de trihydrate d'alumine. Finalement, les cristaux sont calcinés afin d'en retirer toutes traces d'eau. L'oxyde d'aluminium est ainsi obtenu sous forme de poudre blanche, communément appelée alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Il est intéressant de mentionner qu'il faut de quatre à cinq tonnes de bauxite pour obtenir environ deux tonnes d'alumine qui donnent à leurs tours une tonne d'aluminium. La Figure 1.1 présente le schéma du procédé Bayer.

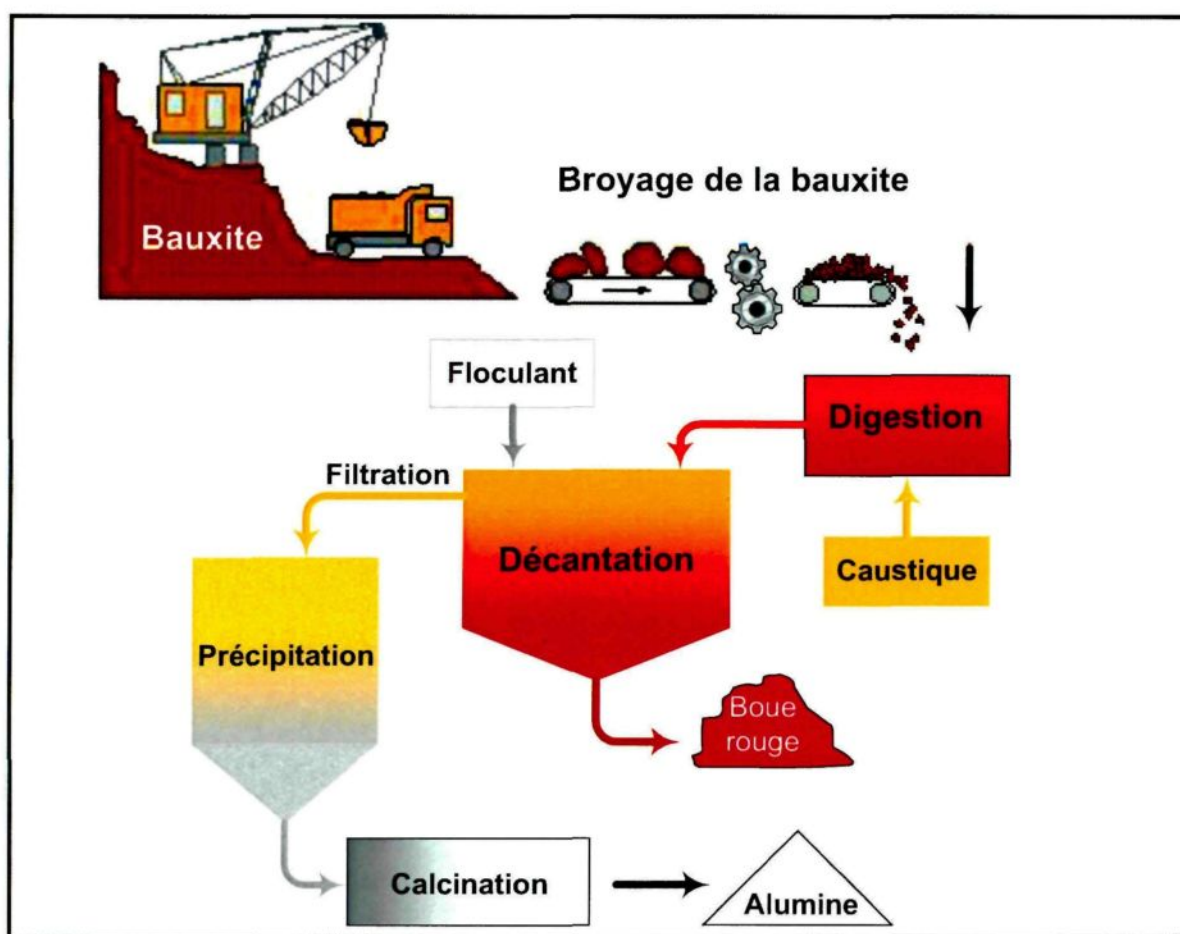


Figure 1.1 – Schéma du procédé Bayer

La décantation est une étape clé du procédé Bayer. En effet, c'est au cours de cette étape que les particules solides sont retirées de la liqueur par floculation et décantation. Au cours des dernières années, les structures industrielles nécessaires à la fabrication d'aluminium (ex : les décanteurs) ont dû être adaptées afin de répondre à la demande croissante du marché<sup>(1)(2)(3)</sup>. Par ailleurs, étant donné la diminution de la qualité des gisements de bauxite disponibles, des quantités plus importantes doivent être traitées par les décanteurs pour répondre à la demande. Conséquemment, les installations industrielles doivent être plus grandes et plus performantes pour atteindre les objectifs de productivité et ainsi répondre au besoin en alumine. Cependant, étant donné la taille de ces installations, il devient difficile de prévoir le comportement et le déplacement des boues rouges dans les décanteurs<sup>(4)</sup>. Bien évidemment, ce manque d'informations occasionne certains problèmes, entre autres, en limitant les possibilités d'optimisation de l'étape de séparation solide/liquide.

La problématique principale de cette étude consiste à développer une méthodologie permettant d'identifier et de comprendre les comportements caractéristiques et les déplacements des boues rouges afin d'optimiser l'étape de séparation solide/liquide. Le développement de cette méthode serait d'une grande importance pour les compagnies minières. En effet, cette méthode pourrait permettre d'obtenir des informations de bases quant à l'évaluation du temps de résidence des décanteurs et aux types de déplacements de la boue (écoulement piston, dispersion axiale, etc.). De plus, l'utilisation d'une méthode de mesure spécifique pourrait aider à diagnostiquer certains problèmes et/ou à évaluer

l'efficacité du décanteur. Par exemple, il serait possible d'évaluer le phénomène des chemins préférentiels « rat hole », l'accumulation de boue « zone morte », la recirculation de boue, l'entartrage des râteaux ou encore d'évaluer l'efficacité de certains paramètres opérationnels tels que la configuration des râteaux et du décanteur (géométrie), de l'emplacement des puits de sousverse, etc. En somme, l'identification de problèmes et/ou l'évaluation de l'efficacité des décanteurs permettraient de diminuer les coûts associés à la production d'alumine. De plus, l'utilisation de ce type de méthode permettrait d'améliorer la compréhension des comportements et des déplacements de la boue dans les décanteurs.

Il existe dans la littérature plusieurs types de traceur et de méthodologie de détection proposée pour caractériser le temps de résidence des décanteurs. Le Tableau 1.1 présente une revue littéraire sommaire d'essais de traçage effectués dans des décanteurs. Cependant, très peu de ces méthodes sont applicables pour effectuer le traçage des solides dans le procédé Bayer étant donné sa nature chimique spécifique. Néanmoins, des essais de traçage préliminaires<sup>(1)(3)(5)</sup> démontrent qu'il est possible de caractériser le temps de résidence d'un décanteur de boue rouge avec un traceur de fer d'une granulométrie correspondant à celle des particules de boue. Plusieurs variables influencent l'efficacité de cette technique de traçage, entre autres : la méthode de détection du traceur, la sensibilité de la méthode, les débits utilisés, le type de traceur utilisé, etc. L'amélioration et la standardisation d'une telle technique pourraient permettre de caractériser le comportement et le déplacement de la boue rouge. Cette méthode de traçage, utilisée conjointement avec



une méthode d'analyse rigoureuse des données, devrait permettre d'obtenir le maximum d'informations des courbes obtenues.

| Type de traceur               | Méthodologie de détection           | Milieu                    | Références              |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Poudre de fer / solide        | Détection électromagnétique         | Procédé Bayer             | (1) (3) (5)             |
| Chlorure de lithium / liquide | Spectrométrie d'adsorption atomique | Eaux usées, Procédé Bayer | (6) (7) (8) (9)         |
| Acide carboxylique / liquide  | Chromatographie gazeuse             | Procédé Bayer             | (10)                    |
| Nitrate de sodium / liquide   | Chromatographie                     | Procédé Bayer             | (11)                    |
| Sulfate de baryum / solide    | Rayon X                             | Procédé Bayer             | (12)                    |
| Radio-isotopes / solide       | Radiodétection                      | Procédé Bayer, Eaux usées | (2) (13) (14) (15) (16) |
| Fluorure / liquide            | Non-spécifié                        | Eaux usées                | (17)                    |
| Encre / liquide               | Fluorimétrie                        | Eaux usées                | (18) (19) (20)          |
| Chlorure de sodium / liquide  | Conductivité                        | Eaux usées                | (21)                    |

**Tableau 1.1 – Revue littéraire d'essais de traçage dans des décanteurs**

## 1.2 Les objectifs

L'objectif principal de ce projet de recherche consiste à développer une méthode de mesure efficace, pouvant être utilisée dans les décanteurs industriels, permettant d'identifier les comportements caractéristiques du déplacement des boues rouges afin d'optimiser l'étape de séparation solide/liquide. La méthodologie proposée consiste à utiliser un traceur ferromagnétique dans les boues rouges et à détecter celui-ci grâce à une bobine d'induction, ce qui permet d'évaluer le temps de résidence des boues rouges et d'analyser le comportement de déplacement de la boue. Ces analyses permettent ainsi d'évaluer l'état du décanteur et de diagnostiquer certains problèmes. De plus, elles permettent également d'évaluer les effets de certains paramètres sur le transport des boues tels que l'efficacité des râteaux, la présence de chemins préférentiels, etc. Les objectifs du projet consistent donc à :

- **Perfectionner** la méthode de mesure par traçage ferromagnétique pour la rendre efficace, reproductible et facilement utilisable dans les conditions d'opération du procédé Bayer.
- **Effectuer** des essais de séparation solide/liquide et de traçage ferromagnétique dans un décanteur expérimental à échelle réduite, en contrôlant les principales variables, afin d'établir des signatures de comportements typiques du déplacement de la boue.
- **Développer une méthode d'analyse** des courbes de distribution du temps de résidence (RTD) obtenues afin d'identifier les comportements caractéristiques du déplacement des boues rouges dans un décanteur.
- **Valider** la méthode de mesure par des essais à l'échelle industrielle.

## 1.3 Travaux antérieurs et aspects originaux de la recherche

### 1.3.1 *Principe du traçage et distribution du temps de résidence*

L'amélioration des performances d'un décanteur industriel existant ou l'étude de nouveaux décanteurs nécessitent une bonne connaissance de l'écoulement ou des déplacements se produisant à l'intérieur de celui-ci<sup>(6)</sup>. Ainsi, le concept de distribution du temps de résidence « RTD » a été introduit par Danckwerts en 1953 afin de caractériser l'écoulement dans les réacteurs<sup>(6)(22)(23)</sup>. Ce dernier a été maintes fois décrit dans la littérature<sup>(24)(25)</sup> et consiste à utiliser un traceur, dont une concentration donnée est injectée à l'entrée d'un réacteur, pour suivre en fonction du temps l'évolution de sa concentration à la sortie<sup>(7)</sup>. L'analyse des données ainsi recueillies permet d'obtenir la courbe de distribution du temps de résidence du réacteur. En plus de caractériser l'écoulement des réacteurs, les courbes de RTD peuvent aussi être utilisées comme instrument de diagnostic pour déterminer les défaillances d'un réacteur ou encore être utilisées lors de la modélisation du comportement d'un réacteur et/ou dans l'estimation de ses performances.

Les courbes de RTD se présentent souvent sous forme de courbes en cloche plus ou moins étalées. Il est possible de les identifier avec des fonctions mathématiques connues, du type sommes exponentielles, par exemple. Toutefois, cet ajustement purement mathématique n'apporte pas d'information sur le comportement physique du réacteur<sup>(6)</sup>. Afin d'obtenir un modèle réaliste, il faut s'appuyer sur quelques idées simples suggérées par la physique d'une part et sur la construction du réacteur d'autre part. Ainsi,

l'écoulement global (représenté par la RTD) est souvent le résultat de la juxtaposition et de l'interconnexion de diverses zones où règnent des conditions d'écoulement particulières<sup>(6)</sup>. Six types d'écoulement sont généralement utilisés ; l'écoulement piston « PFR », l'écoulement parfaitement agité « CSTR », le court-circuit, la zone morte, la recirculation et la cascade de réservoirs en série<sup>1</sup>. Conséquemment, l'analyse de la RTD peut s'effectuer de différentes façons tout dépendamment de l'information recherchée. La méthode classique consiste à associer les différents types d'écoulement (ex : réacteurs idéaux en série ou en parallèle) pour représenter théoriquement l'écoulement observé et déterminer la fonction de transfert correspondante permettant la comparaison des informations expérimentales et théoriques<sup>(7)</sup>. L'utilisation des différents modèles de comportement existants permet cependant de simplifier le temps d'analyse (modèle de dispersion axiale, modèle compartimenté, modèle des réservoirs en série)<sup>2</sup>.

### ***1.3.2 Caractéristiques idéales du traceur***

Le choix du traceur utilisé dans un milieu dépend de plusieurs paramètres. Ainsi, un traceur idéal devrait être une substance unique (différente du milieu analysé), c'est-à-dire qu'il ne devrait pas être présent dans le milieu ou en quantité très infime<sup>(10)</sup>. Le traceur utilisé devrait également être stable, c'est-à-dire qu'il ne devrait pas se dégrader dans le

---

<sup>1</sup> Une description détaillée des types d'écoulement est présentée au chapitre 4 portant sur la théorie de la distribution du temps de résidence.

<sup>2</sup> Une description détaillée des modèles est présentée au chapitre 4 portant sur la théorie de la distribution du temps de résidence.

milieu durant un essai de traçage. Par ailleurs, il devrait être inerte et non réactif avec le milieu (de type conservateur)<sup>(1)(10)</sup>. En effet, il ne devrait pas participer aux réactions chimiques ou physiques qui pourraient en affecter sa distribution. De plus, il ne devrait pas pouvoir précipiter ou être adsorbé sur la surface des solides présents. Bien évidemment, le traceur utilisé doit être compatible avec l'environnement chimique et physique du réacteur et doit être suffisamment similaire aux particules du milieu tracées afin d'avoir les mêmes propriétés d'écoulement.

D'autre part, le traceur utilisé devrait être facile à manipuler. En effet, il ne doit pas nécessiter une procédure de manipulation spéciale ou être dangereux<sup>(1)(10)</sup>. De plus, il doit avoir peu ou pas d'impact sur l'environnement (être non toxique)<sup>(1)(11)(26)</sup>. Par ailleurs, le traceur utilisé doit être détectable à de faibles concentrations afin de ne pas affecter le procédé et la qualité du produit de fabrication (non contaminant) en plus d'être peu coûteux<sup>(10)(11)(26)</sup>. Le traceur doit également être facilement analysable afin de ne pas allonger inutilement le temps de traçage.

### ***1.3.3 Méthode analytique***

La détermination de la distribution du temps de résidence est une technique largement utilisée dans le domaine du génie chimique (traitements des eaux, réacteurs chimiques, cycloniques, pyrolytiques, etc.). Peu importe le réacteur utilisé, le succès d'un programme de traçage dépend en grande partie du degré de reproductibilité, de sensibilité et de la rapidité de la technique d'analyse des résultats<sup>(11)</sup>. De plus, la méthode de mesure du

traceur doit être très rigoureuse et suffisamment précise pour établir un bilan massique significatif du traceur après l'expérimentation<sup>(11)</sup>. Ainsi, la première étape au cours d'un essai de traçage consiste à s'assurer que le système à l'étude soit suffisamment stable (ex : atteinte des conditions d'équilibre de la concentration solide du lit, de l'alimentation, des débits, etc.). S'ensuit l'étape de l'injection du traceur. Le traceur peut être injecté de trois façons différentes : sous forme d'impulsion, d'échelon ou de façon quelconque<sup>(7)</sup>. Ensuite, l'analyse des résultats permet d'obtenir la RTD du réacteur ainsi que son bilan massique.

### ***1.3.4 Traçage dans le procédé Bayer***

#### ***1.3.4.1 Type de traceurs***

Il est difficile d'effectuer des essais de traçage dans le procédé Bayer. En effet, le caractère chimique agressif du milieu et les concentrations élevées des différentes substances retrouvées nuisent à la réalisation d'un essai de traçage<sup>(10)</sup>. En fait, le procédé Bayer présente une combinaison variée de conditions qui empêche le développement d'un traceur facilement repérable. Ainsi :

- La liqueur Bayer contient une quantité importante d'impuretés. Plusieurs de ces impuretés (ex : matière organique et inorganique) auraient fait d'excellents traceurs. Néanmoins, elles ne peuvent être utilisées puisqu'elles sont déjà présentes en trop grande quantité et variables.
- De façon similaire, la bauxite broyée contient également une quantité variée de substances. Plusieurs de ces substances peuvent être utilisées en tant que traceur, cependant la méthode de détection doit être suffisamment efficace afin de s'assurer

qu'il n'y ait pas d'interférence entre la quantité ajoutée et celle déjà présente dans le milieu.

- La bauxite contient une variété de minerais dont les particules broyées sont de différentes tailles. Un traceur solide doit par conséquent pouvoir simuler l'ensemble de ces particules sans interagir avec le milieu.
- L'environnement chimique est très hostile. Conséquemment, plusieurs types de traceurs peuvent se dégrader au contact de la liqueur Bayer.
- Des réactions de précipitation et d'adsorption peuvent se produire dans le procédé Bayer. Par conséquent, un traceur en solution pourrait potentiellement précipiter et/ou s'adsorber sur les particules solides et ne plus convenir pour mesurer la courbe de RTD.
- Par ailleurs, certains types de traceurs peuvent contaminer l'hydrate et l'alumine, ce qui en fait des traceurs inutilisables.
- La liqueur Bayer est un milieu très complexe et difficile à analyser pour détecter certains types de traceurs.
- Les installations industrielles du procédé Bayer sont très grandes. Ainsi, les quantités de traceur utilisées pour obtenir une faible limite de détection sont tout de même importantes. Par conséquent, le traceur utilisé doit être très peu coûteux pour que l'essai de traçage soit économiquement viable pour l'industrie.

Au cours des dernières années, plusieurs essais de traçage ont été effectués dans les différentes étapes du procédé Bayer. Les traceurs utilisés se retrouvent sous diverses formes (liquide et solide). Chaque type de traceur simule un des composants spécifiques du milieu, soit la liqueur Bayer ou la bauxite broyée. Bien évidemment, le fait de simuler la liqueur ou le résidu solide ne fournira pas les mêmes informations pour la détermination du temps de résidence. Par conséquent, il faut bien cibler le type d'information recherchée avant de choisir le type de traceur. Parmi les types de traceur utilisé dans le procédé Bayer, il y a : des éléments radioactifs<sup>(2)(13)(27)</sup>, du chlorure de lithium<sup>(8)</sup>, des acides carboxyliques<sup>(10)</sup>, du nitrate de sodium<sup>(11)</sup>, du sulfate de baryum<sup>(12)</sup> et de la poudre de fer<sup>(1)(3)(5)</sup>. La prochaine section présente un résumé de quelques essais de traçage pertinents effectués dans le procédé Bayer.

#### ***1.3.4.2 Exemple d'essai de traçage***

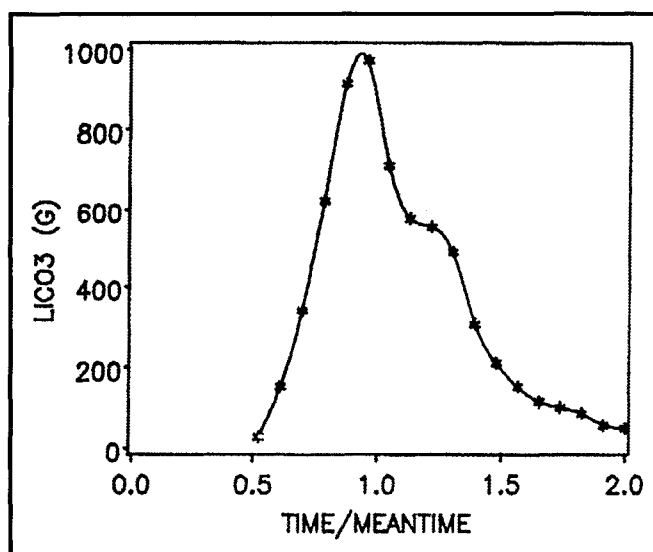
Kato et al.<sup>(2)</sup> ont développé une méthode de traçage par radio-isotopes afin de caractériser le temps de résidence d'un décanteur de boue rouge. Deux types de traceurs ont été utilisés. Le premier est obtenu en activant le Fe présent dans la bauxite par irradiation de neutrons (production d'atomes radioactifs par transmutation) et le second est constitué d'une solution de <sup>32</sup>P. Les résultats obtenus ne sont pas présentés mais leurs techniques semblent suffisamment efficaces. Néanmoins, l'utilisation de radio-isotopes est difficile et nécessite une attention particulière lors de la manipulation. De plus, ce type de traceur est nuisible pour l'environnement.



Cristol et al.<sup>(27)</sup> ont également utilisé un traceur radioactif pour effectuer un essai de traçage dans les précipitateurs du procédé Bayer (4 précipitateurs en série). Les résultats obtenus démontrent clairement que l'écoulement à l'intérieur des premiers précipitateurs est de type CSTR et qu'il y a présence d'un court-circuit. L'intégrale de convolution a été utilisée pour valider les courbes expérimentales obtenues entre les différents précipitateurs (courbes d'entrée et de sortie). Ils ont ainsi démontré que les précipitateurs pouvaient être représentés par une série de réacteurs PFR en parallèle. En comparant les courbes expérimentales au modèle des réservoirs en série, ils ont établi qu'environ 32 % de l'écoulement des précipitateurs est associé au court-circuit. Le degré de performance de chacun des précipitateurs a ainsi été obtenu grâce au modèle utilisé.

Evans<sup>(13)</sup> a effectué un traçage dans un décanteur de boue rouge afin d'évaluer le mouvement résiduel de la boue et l'efficacité d'un râteau. Les essais ont été réalisés dans un décanteur de 30 m de diamètre et un traceur radioactif d'or-198 a été utilisé pour simuler le déplacement de la boue. Le traceur a été introduit dans l'alimentation du décanteur et préalablement mélangé à de la boue. Des échantillons de boue ont été prélevés à la sousverse du décanteur. L'analyse du temps de résidence a démontré que les lames du râteau servent plus à homogénéiser la boue qu'à la déplacer vers la sousverse et que seulement 50 % de la surface du décanteur est utilisée dans la décantation. Conséquemment, beaucoup d'améliorations peuvent être apportées dans le design des décanteurs pour limiter la quantité de liquide évacué avec la boue.

Une autre étude<sup>(8)</sup> a été effectuée pour déterminer la RTD des digesteurs de boue rouge ainsi que les facteurs pouvant l'influencer (température, débit, ratio alumine/caustique et présence de silicate en solution). Les essais ont été réalisés en ajoutant un traceur de chlorure de lithium et en échantillonnant la suspension de boue à la sortie des digesteurs. Les résultats obtenus, présentés à la Figure 1.2, ont démontré que le temps de résidence expérimental correspond à celui préalablement calculé (courbe approximativement centrée à 1) mais qu'il y a présence de rétro-mélange à l'intérieur du digesteur (longue queue). L'effet du rétro-mélange favoriserait la diminution de la quantité de silicate (effet bénéfique). Aucune analyse plus poussée de la courbe de RTD n'a été réalisée.



**Figure 1.2 – Courbe de temps de résidence**

Grocott et McGuiness<sup>(10)</sup> ont observé la RTD de la liqueur d'un décanteur de boue rouge en mélangeant un acide carboxylique halogéné à la liqueur Bayer. Le traceur est

déecté par chromatographie capillaire en phase gazeuse et les échantillons proviennent de trois zones distinctes du décanteur (profondeurs variées). Les résultats démontrent que la liqueur Bayer circule très rapidement dans ce type de décanteur et que le déplacement de la boue s'effectue principalement comme un écoulement piston. Bien évidemment, les résultats obtenus pour le traçage de boue sont plus ou moins représentatifs car le traceur utilisé simule principalement la liqueur Bayer. Néanmoins, les observations amenées permettent d'avoir une compréhension générale de l'écoulement de la boue.

Harrison, Lépine, Gaboury et Thé<sup>(11)</sup> ont observé la distribution du temps de résidence des unités de précipitation d'hydrate en mélangeant du nitrate de sodium à la liqueur Bayer. Ainsi, en échantillonnant la liqueur Bayer à la surverse et à la sousverse par chromatographie par échanges d'ions, ils ont pu déterminer la signature typique du précipitateur sous deux différents débits. Les résultats obtenus démontrent que les précipitateurs agissent principalement comme des réacteurs à écoulement piston lorsque les débits sont élevés. De façon similaire, les zones mortes sont également plus importantes lorsque les débits sont élevés (l'augmentation du débit favoriserait l'apparition de cheminements préférentiels).

Une autre étude<sup>(12)</sup> a observé la RTD dans l'étape de prédigestion du procédé Bayer. Un traceur de sulfate de baryum a été utilisé sous forme de poudre broyée afin de suivre les particules solides de la bauxite. Au cours d'un essai, le sulfate de baryum broyé est mélangé à la boue d'alimentation du digesteur puis des échantillons sont récoltés à la

sousverse de celui-ci. Le traceur est détecté avec une méthode de fluorescence par rayons X. Les résultats obtenus ont permis de démontrer que le type d'écoulement retrouvé dans le digesteur n'était pas parfaitement agité (CSTR). En effet, ils ont conclu que le volume du digesteur était trop grand par rapport à ses capacités de mélange (bref, que les conditions de mélange n'était pas idéales). Ainsi, ils ont effectué d'autres essais de traçage pour caractériser différentes performances associées aux méthodes d'agitation du digesteur. Conséquemment, la méthode de traçage permet non seulement de caractériser l'écoulement du réacteur mais également les performances de certains paramètres opérationnels.

D'autres chercheurs<sup>(1)(3)(5)</sup> ont utilisé une poudre de fer, d'une granulométrie correspondant à certaines particules de boue, pour simuler le comportement de sédimentation et le déplacement de la boue dans un décanteur de boue rouge. Ces mêmes chercheurs<sup>(1)(3)(5)</sup> ont également développé une méthode de détection de la poudre de fer basée sur une technique électromagnétique. L'avantage de cette méthode de détection est qu'elle s'effectue en continu sans échantillonnage de la boue. Les essais expérimentaux ont démontré que la distribution du temps de résidence était similaire à celles observées par d'autres chercheurs pour des décanteurs similaires (similaire à un écoulement piston) mais que cette dernière possédait une modulation qui correspondrait possiblement au passage du râteau dans le décanteur. Par conséquent, cette technique de traçage permettrait possiblement de diagnostiquer aussi les râteaux du décanteur.

## **CHAPITRE 2**

### **LE PROCÉDÉ BAYER**

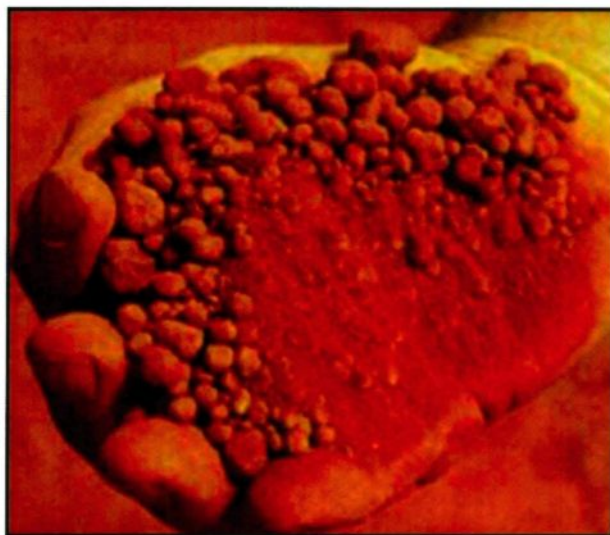
Plus de 90 % de la production d'alumine dans le monde est basée sur le procédé Bayer. Malgré le fait que ce dernier a subi beaucoup d'améliorations au cours des années, entre autres au niveau des installations mécaniques, de la méthodologie et de l'automatisation du procédé, les principes chimiques et physiques de base sont restés les mêmes. Les principales étapes du procédé Bayer ont été énumérées et décrites brièvement au Chapitre 1. Le présent chapitre fournit une description plus détaillée de chacune de ces étapes<sup>(16)(28)(29)(30)(31)(32)(33)(34)(35)(36)</sup>. Mentionnons cependant que des variantes peuvent être observées tout dépendamment de l'usine et des installations disponibles.

#### **2.1 La bauxite**

L'aluminium est un élément métallique abondant dans le monde. Il constitue environ 8 % de la croûte terrestre et se présente sous forme d'oxydes. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour l'obtention de l'alumine, composé intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. Ce minerai fut découvert en 1821 aux Baux-de-Provence par

Pierre Berthier. Le nom de bauxite lui fut attribué en 1861 par Henry Sainte-Claire Deville et il désigne tous les minerais contenant des quantités importantes d'oxyde d'aluminium.

La bauxite est une roche sédimentaire de structure variée contenant des proportions variables d'hydrates d'alumine, de kaolinite, de silice et d'oxydes de fer qui lui confèrent sa coloration rouge caractéristique (il existe certaine bauxite grise). L'alumine contenue dans la bauxite se présente principalement sous deux formes : trihydratée comme la gibbsite ou monohydratée comme la boémite ou le diaspore. La gibbsite trihydratée ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) provient principalement des bauxites tropicales et est la plus économique à traiter. La boémite et le diaspore monohydraté ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) proviennent des bauxites dites européennes et chinoises et elles nécessitent des conditions de température et de pression beaucoup plus élevées que la gibbsite pour être traités.



**Figure 2.1 – Minerai de bauxite**

En général, la concentration d'oxyde d'aluminium hydraté dans la bauxite se situe entre 40 et 60 %. La fraction restante est constituée d'impuretés présentes dans la bauxite telles que les oxydes de fer, de silice et de titane. Le Tableau 2.1 présente les principaux constituants de la bauxite. D'autres impuretés se retrouvent dans la bauxite mais en quantité infime (traces inférieures à 1 ppm). La présence de ces impuretés, telles que le carbone organique, le phosphate, l'arsenic, le fluorure et bien d'autres peut interférer dans le bon fonctionnement du procédé Bayer puisqu'elles peuvent se solubiliser dans la liqueur au cours de la digestion et précipiter avec l'hydrate dans une étape ultérieure.

| Mineral          | Formule   | Pourcentage |
|------------------|---|-------------|
| Gibbsite         | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$                     | 30,0 - 60,0 |
| Hématite         | $\text{Fe}_2\text{O}_3$   | 1,0 - 30,0  |
| Boémite          | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$                      | 0,2 - 20,0  |
| Anatase / Rutile | $\text{TiO}_2$  | 0,3 - 10,0  |
| Argile           | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 0,3 - 60,0  |
| Quartz           | $\text{SiO}_2$  | 0,2 - 10,0  |

Tableau 2.1 – Composition minéralogique des bauxites (composants majeurs)

## 2.2 Le procédé Bayer

Le procédé Bayer a été inventé en 1887 par Karl Joseph Bayer. Ce procédé permet d'extraire l'alumine de la bauxite grâce à une dissolution par de la soude. Le procédé Bayer est utilisé dans la fabrication de l'aluminium puisqu'il est le moyen le plus économique d'extraire l'alumine. Cette section porte sur les étapes principales du procédé Bayer.

### 2.2.1 Broyage de la bauxite

Cette étape consiste à diminuer la taille du minerai afin de faciliter la mise en solution de l'alumine contenue dans la bauxite. Ainsi, le minerai est tamisé et broyé. Les grosses particules sont recirculées, puis broyées de nouveau afin d'atteindre la taille souhaitée. La Figure 2.2 illustre les étapes de fonctionnement d'une unité de broyage. Un broyage grossier signifie que l'alumine contenue dans la bauxite n'aura pas été extraite en totalité. Par contre, un broyage trop fin indique une plus grande dépense d'énergie, ce qui augmente les coûts du procédé.

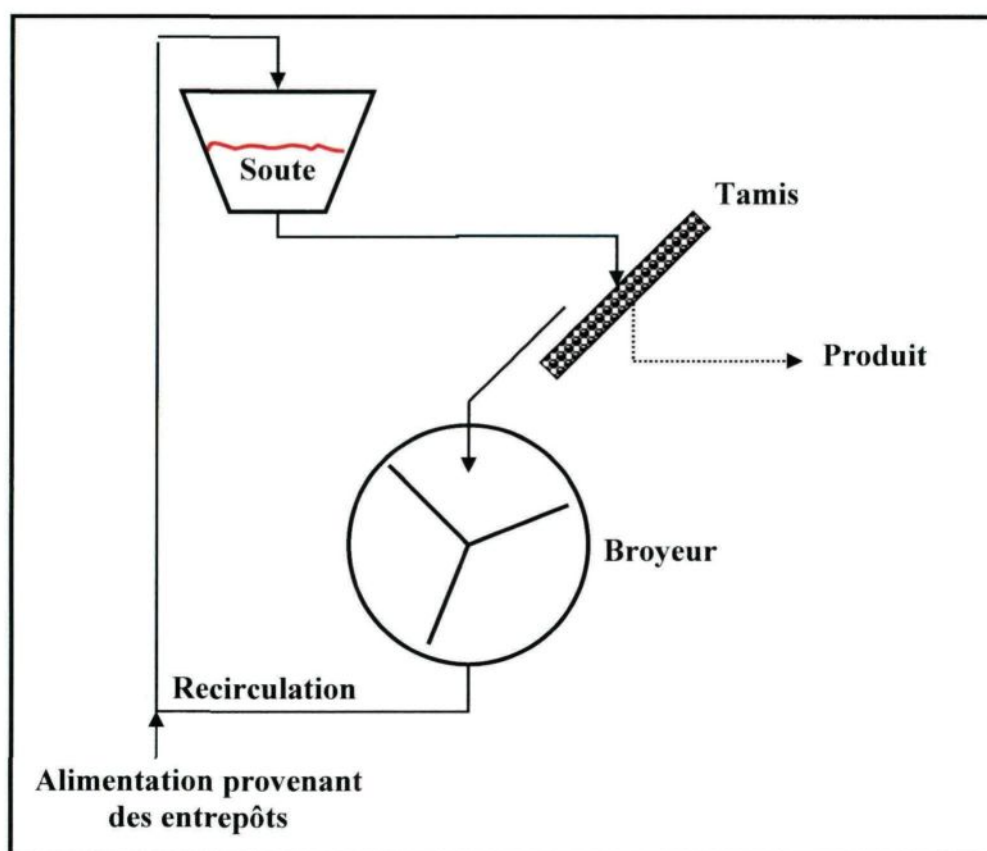


Figure 2.2 – Broyage de la bauxite



### 2.2.2 Mélange

La bauxite, une fois broyée, est mélangée (Figure 2.3) à de la chaux afin de précipiter le phosphate extrait de la bauxite et ainsi atténuer le risque de précipitation de l'hydrate d'alumine durant l'étape de séparation solide/liquide. De plus, la présence de phosphate dans l'alumine aurait pour conséquence de diminuer l'efficacité du courant dans le procédé d'électrolyse. Par la suite, le mélange chaux/bauxite est ajouté à de la liqueur usée arrivant des décanteurs de l'étape de séparation solide/liquide blanc. La pulpe ainsi produite par le mélange de la liqueur usée, de la bauxite broyée et de la chaux contient environ 50 % de matières solides et est à une température de 85 °C.

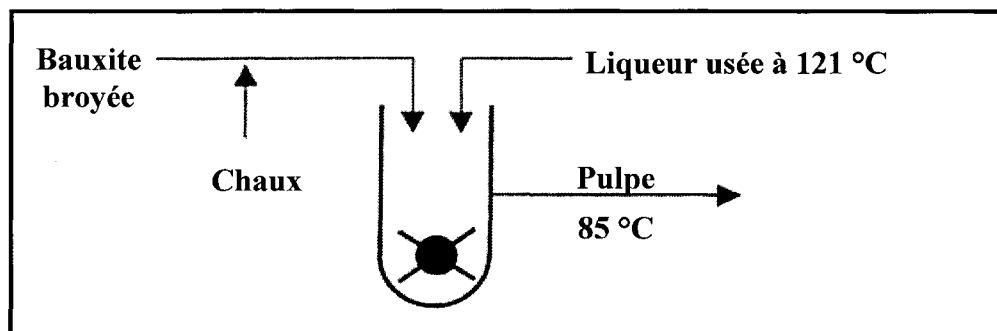
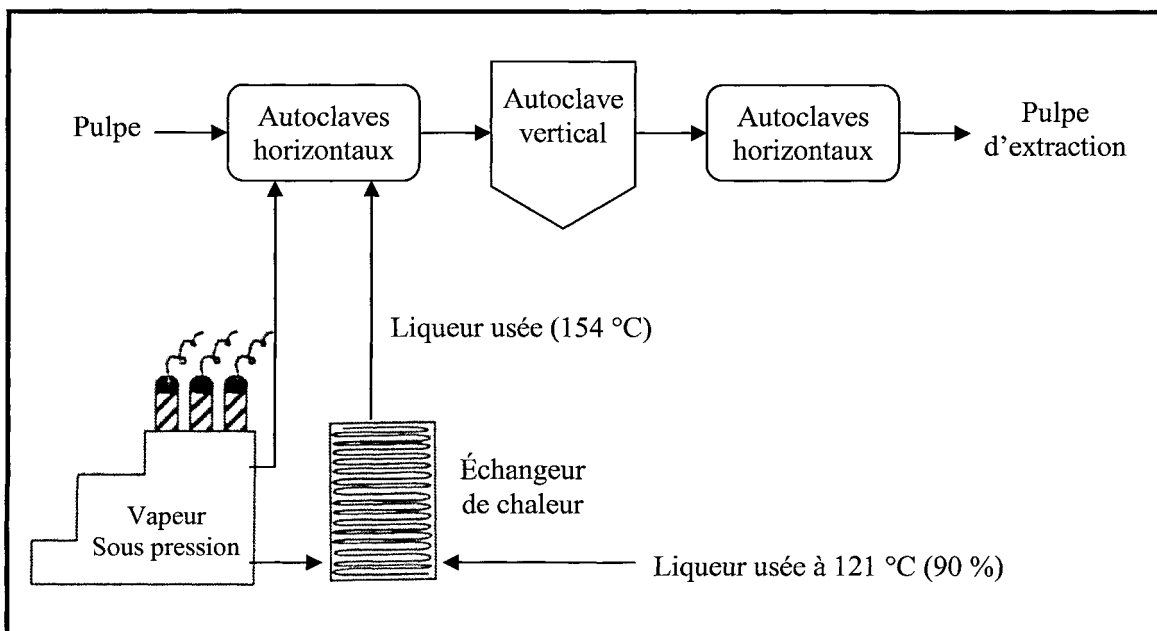


Figure 2.3 – Schéma du mélange de la bauxite, de la chaux et de la liqueur usée

### 2.2.3 Digestion

La digestion (Figure 2.4) est une étape importante du procédé Bayer. Son rôle principal est de dissoudre le trihydrate d'alumine dans la liqueur caustique (liqueur usée chaude). Ainsi, au cours de l'étape de la digestion, la pulpe (mélange de bauxite broyée, liqueur et chaux) à 85 °C est dirigée vers les autoclaves. De la liqueur usée, préchauffée à

154 °C par de la vapeur vive via un échangeur de chaleur, est aussi injectée dans les autoclaves. Sous des conditions spécifiques de température (143 °C) et de pression (300 - 450 kPa), l'alumine contenue dans la bauxite se solubilise dans la liqueur Bayer à travers une série d'autoclaves. Les autoclaves peuvent être horizontaux ou verticaux et ils permettent d'assurer un temps de résidence suffisamment long (environ une heure) pour permettre la solubilisation du trihydrate d'alumine et la dessilication (précipitation de la silice). Le produit issu de l'étape de la digestion s'appelle la pulpe d'extraction.

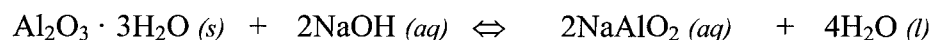


**Figure 2.4 – Schéma de la digestion**

Plusieurs réactions chimiques se produisent au cours de l'étape de digestion. Voici les deux principales réactions :

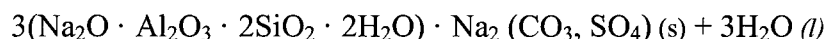
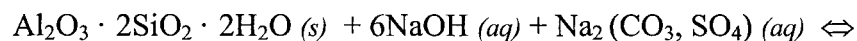
- La première réaction chimique implique la dissolution dans la liqueur Bayer du trihydrate d'alumine présent dans la bauxite.

Trihydrate d'alumine + Caustique  $\Leftrightarrow$  Aluminate de sodium + Eau (en solution)



- La seconde réaction implique que l'argile (composée de silice), présente dans la bauxite sous forme de kaolinite, est d'abord dissoute puis précipitée dans la liqueur pour former le produit de dessilication (sodalite) du procédé Bayer.

Kaolinite + Caustique + Soda  $\Leftrightarrow$  Sodalite (solide) + Eau



La sodalite formée au cours de la seconde réaction est rejetée dans la boue lors de la séparation solide/liquide. Par conséquent, une quantité de caustique est perdue durant le procédé. En effet, la conversion de 1,0 kg de silice ( $\text{SiO}_2$  sous forme de kaolinite) en sodalite occasionne la perte de 1,0 kg de caustique ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) et de 0,13 kg d'alumine. Les coûts de production augmentent donc avec la quantité de silice contenue dans la bauxite.

Par ailleurs, le temps de digestion du procédé Bayer est gouverné par le taux de précipitation du silicate. En effet, une trop grande concentration de silicate dans la pulpe conduit à une contamination de l'alumine. Plusieurs facteurs peuvent influencer le taux de dessilication tels que la concentration initiale de silicate dans la bauxite, la température de l'étape de la digestion et la concentration en caustique de la liqueur Bayer. La digestion de la bauxite entraînera d'autres réactions, telles que la dissolution de la gibbsite, la réversion de la boémite, la dissolution partielle des matières organiques et bien d'autres.

### 2.2.4 Séparation solide/liquide

La séparation solide/liquide ou décantation a pour objectif d'éliminer la majorité des particules solides en suspension dans la pulpe d'extraction afin d'obtenir une surverse la plus claire possible et une sousverse contenant un pourcentage de solides élevé. Avant d'être amenée au décanteur, la pulpe d'extraction traverse trois détendeurs qui abaissent la pression de la pulpe à 140 kPa, 70 kPa et 7 kPa. Cette détente produit une vapeur qui est réutilisée pour réchauffer la liqueur usée. La pulpe est ensuite dirigée vers les décanteurs où les matières insolubles qui contiennent la majorité des impuretés ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , etc.) sont retirées par sédimentation et floculation. La Figure 2.5 présente un schéma de l'étape de décantation où les résidus sont dirigés vers le site de traitement des boues rouges et le surnageant, qui contient le  $\text{NaAlOH}_4$  en solution, est dirigé vers le réservoir d'alimentation des filtres (ALF).

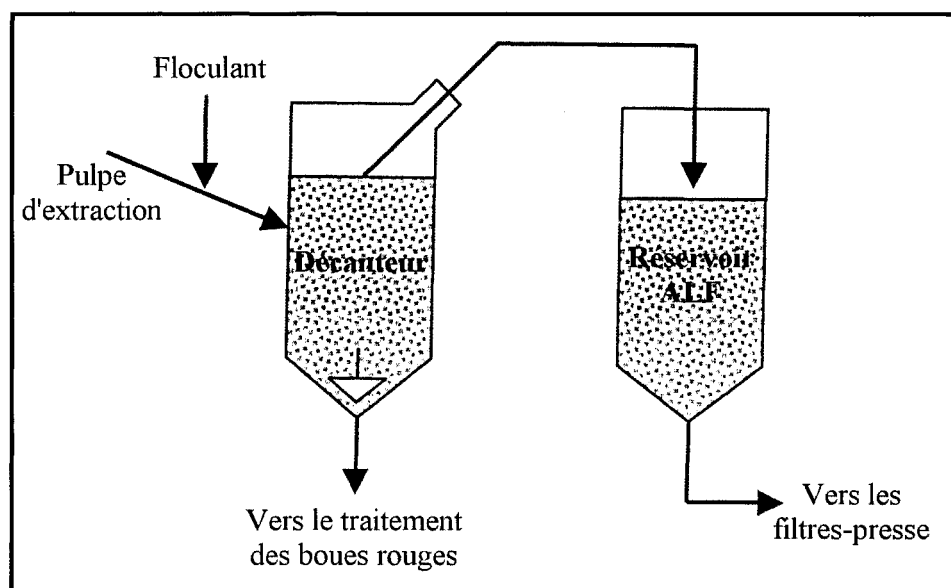


Figure 2.5 – Schéma de la séparation solide/liquide

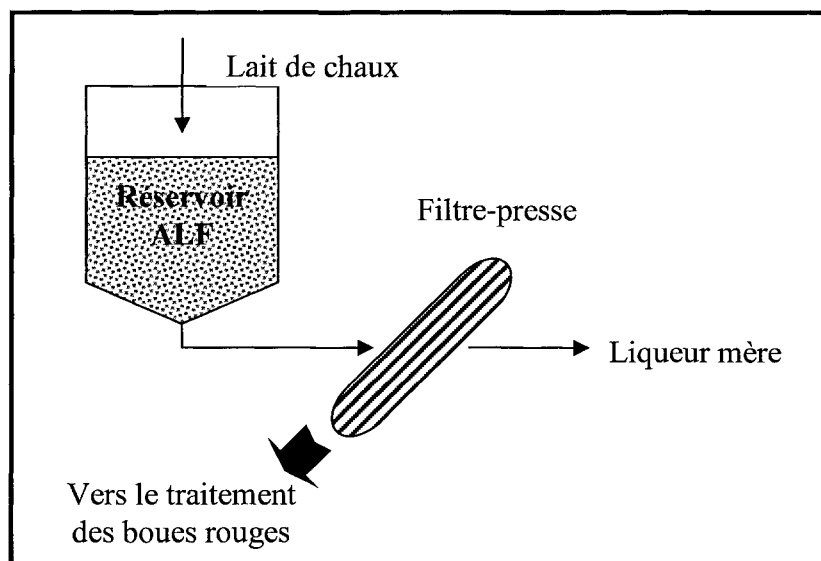
Plusieurs facteurs peuvent influencer la décantation, tels que la quantité de particules solides en suspension, la dimension moyenne des particules en suspension (plus les particules sont fines, plus le temps de décantation est long) et le niveau de turbulence dans le décanteur. Un flocculant synthétique est généralement ajouté lors de l'étape de décantation afin de faciliter l'agglomération des particules en suspension en flocons plus volumineux et ainsi augmenter la vitesse de décantation. L'une des problématiques principales de la floculation est la fragilité des flocons formés. En effet, les flocons se brisent lorsqu'ils subissent une contrainte de cisaillement au-dessus d'une valeur critique engendrant ainsi une diminution de rendement de l'étape de décantation.

### ***2.2.5 Traitement des boues rouges***

Le sédiment issu de l'étape de décantation qui contient les impuretés se nomme boue rouge et la composition de celui-ci dépend de la source de bauxite utilisée. Globalement, il y a approximativement 70 millions de tonnes de boue rouge produites à chaque année. La boue rouge est considérée comme une substance nocive et potentiellement dangereuse puisque son pH varie entre 10 et 13. Ainsi, les boues rouges sont traitées afin de récupérer le plus de caustique avant d'en disposer. C'est pourquoi les boues rouges sont lavées et épaissies avec des flocculants à travers cinq épaississeurs, afin de réduire la concentration en caustique.

### 2.2.6 Filtration

Le surnageant, provenant de l'étape de séparation solide/liquide, est ensuite filtré pour en retirer les impuretés solides encore présentes (Figure 2.6). Du lait de chaux est ajouté à la surverse des décanteurs pour produire le tricalcium aluminate (TCA) qui agit comme aide filtrant, c'est-à-dire comme support solide au lit de filtration. Par la suite, la surverse additionnée de TCA est filtrée sous pression (400 kPa) au moyen de filtres contenant des toiles en polypropylène. Les particules retenues à la surface de la toile forment une couche appelée « gâteau filtrant ». Ce dernier sert de médium filtrant car il permet de retenir les plus petites particules en suspension dans le liquide à filtrer. Lorsque le gâteau devient trop épais et trop dense, la pression dans les filtres devient très élevée et le filtre doit être nettoyé. Les impuretés accumulées sur le filtre sont dirigées vers le site de traitement des boues rouges. À la sortie des filtres, le filtrat (liqueur mère) obtenu contient environ 0,01 g/L de solides (107 °C) et est dirigé vers l'étape de précipitation.



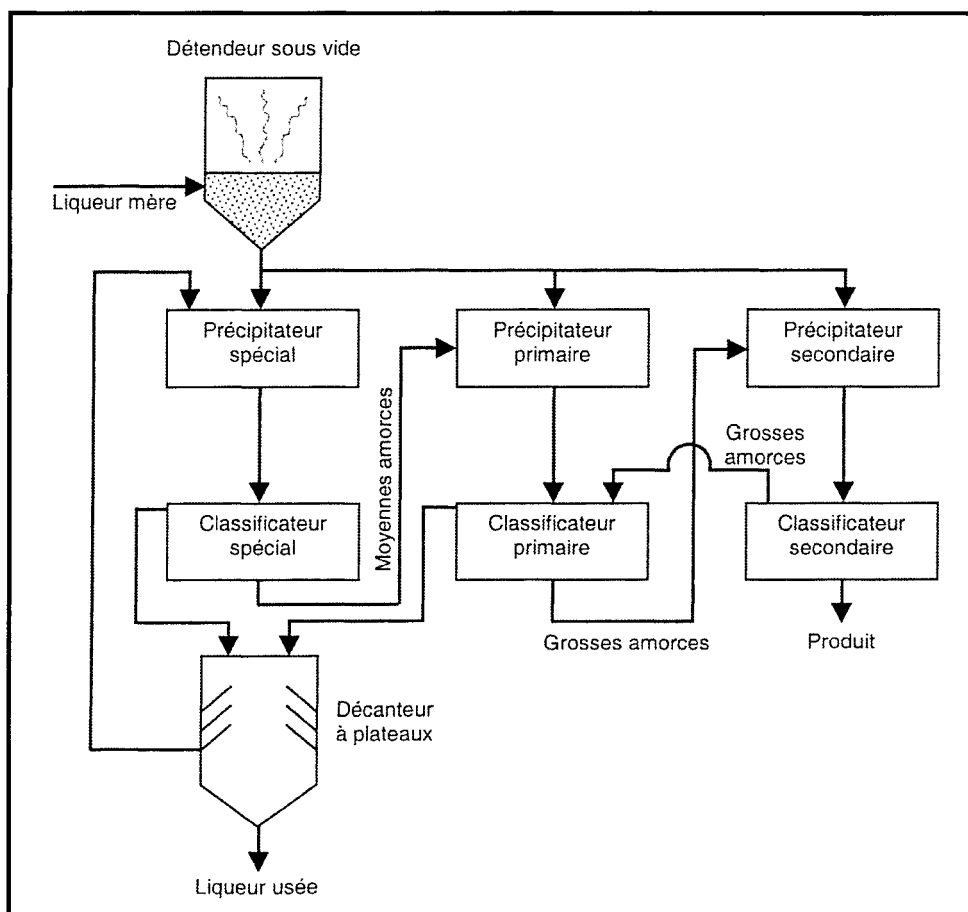
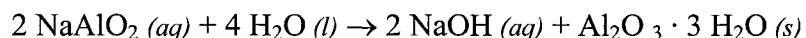
**Figure 2.6 – Schéma de l'étape de filtration**

### ***2.2.7 Précipitation et séparation de l'hydrate d'aluminium***

La liqueur mère provenant de l'étape de filtration est refroidie entre 60 et 85 °C dans un détendeur qui récupère la vapeur pour réchauffer la liqueur usée retournant vers les autoclaves. La liqueur est ensuite entreposée dans des réservoirs où s'amorcent la précipitation par l'ajout des particules d'hydrate récupérées en aval et ayant une taille insuffisante pour être dirigée vers la calcination. La Figure 2.7 présente un schéma sommaire de l'étape de précipitation. Il y a trois types de précipitateurs qui alimentent chacun un classificateur :

- Le précipitateur spécial reçoit les plus petites amorces provenant du décanteur à plateaux. La solution est dirigée vers le classificateur spécial. La sousverse de ce dernier contient les amorces de taille moyenne. La surverse contient les plus fines amorces qui sont dirigées vers le décanteur à plateaux.
- Le précipitateur primaire reçoit la liqueur mère et les amorces moyennes provenant du classificateur spécial. La sousverse du classificateur primaire contient les grosses amorces tandis que la surverse contient les plus petites amorces qui sont dirigées vers le décanteur à plateaux.
- Le précipitateur secondaire reçoit la liqueur mère et les grosses amorces provenant du classificateur primaire. La surverse du classificateur secondaire contient de grosses amorces qui sont dirigées vers le classificateur primaire. La sousverse contient les particules d'hydrate suffisamment grosses pour être classées en tant que produit.

Ainsi, le  $\text{NaAlO}_2$  en solution est précipité sous forme de cristaux grâce à la dilution et au refroidissement graduel de la liqueur mère. Les cristaux sont ensuite séparés de la soude caustique par sédimentation et filtration. La réaction de précipitation du  $\text{NaAlO}_2$  est :



**Figure 2.7 – Schéma de l'étape de précipitation**

Lors de la précipitation, la solution est lentement agitée afin d'uniformiser les sites de germination dans le liquide. La réaction de précipitation nécessite entre 20 et 80 heures. Le décanteur à plateaux est un réservoir de longue durée permettant la séparation des plus

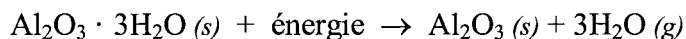


fines particules d'hydrate. La durée de la décantation des particules submicroniques prend plusieurs jours. La succession de plateaux est utilisée pour minimiser la distance et donc le temps de décantation. La surverse des plateaux est la liqueur usée qui sera recyclée.

### **2.2.8 *Calcination et traitement du produit***

Une fois que les cristaux d'hydrate d'alumine sont formés, une série d'étapes supplémentaires est requise afin de fournir un produit fini.

- Lavage de l'hydrate pour diminuer la concentration de la soude caustique transportant le trihydrate d'alumine.
- Décantation pour récupérer l'hydrate solide.
- L'hydrate est ensuite déposé sur des filtres pour être lavé à nouveau et ainsi éliminer toute trace de caustique.
- L'hydrate est séché à 150 °C dans des fours, ce qui élimine l'eau libre. Après le séchage, des cyclones sont utilisés pour séparer les gaz des solides.
- L'hydrate est transporté dans un four rotatif pour y être calciné (1000 – 1200 °C). L'eau liée à l'hydrate est éliminée à des températures supérieures à 600 °C.



- L'alumine est ensuite refroidie dans des lits fluidisés puis transportée dans des silos d'entreposage. L'oxyde d'aluminium obtenu sous forme de poudre blanche est appelé alumine calcinée. Le diamètre des particules d'alumine varie entre 20 – 200 µm.

## **CHAPITRE 3**

### **LES PROCÉDÉS DE SÉPARATION SOLIDE/LIQUIDE**

Les techniques de séparation jouent un rôle prédominant dans les procédés chimiques industriels. À titre d'exemple, les procédés de séparation solide/liquide sont utilisés en plusieurs endroits du procédé Bayer (décantation primaire de la boue rouge, filtration de la liqueur Bayer afin d'en retirer les particules solides, lavage de la boue rouge, séparation de l'hydrate d'alumine, lavage de l'hydrate, etc.). Il existe trois principaux types de séparation solide/liquide : la filtration, la sédimentation et la flottaison. Dans le cadre du présent projet, seule la sédimentation est utilisée. Conséquemment, les notions de base de la sédimentation, les techniques de traitement préliminaires s'y rattachant ainsi que les équipements industriels permettant de l'effectuer seront détaillés dans ce chapitre.

#### **3.1 La sédimentation**

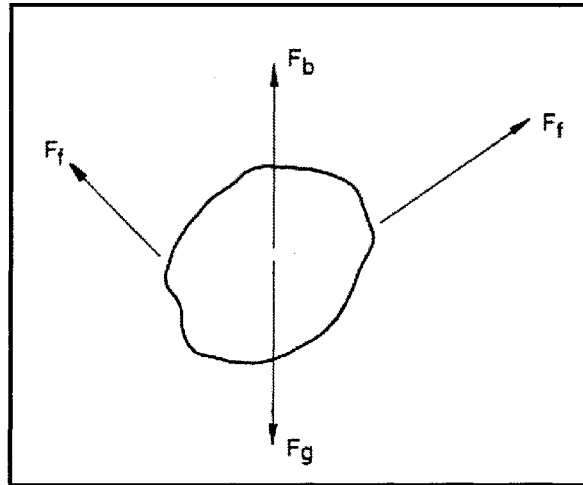
La sédimentation est utilisée pour séparer les particules en suspension dans un liquide sous l'action de la force gravitationnelle<sup>(37)(38)(39)</sup>. Deux objectifs peuvent être atteints par la sédimentation soient la clarification du liquide surnageant et/ou l'épaississement du solide. Le but de la clarification est de retirer le plus de matières en

suspension afin d'obtenir une surverse la plus claire possible. L'épaississement, quant à lui, consiste à augmenter la concentration solide de la sousverse. Les équipements nécessaires à la sédimentation varient en fonction de l'objectif recherché. En effet, un puits d'alimentation profond, un grand réservoir de surverse et l'utilisation d'agents de floculation peuvent permettre d'améliorer la clarté tandis que l'utilisation d'un système de râteau est nécessaire à l'augmentation de la concentration solide. De façon générale, les procédés de séparation sont affectés par des facteurs tels que la taille et la densité des particules (nature des particules), la concentration volumétrique des particules ainsi que la densité et la viscosité du liquide sous des conditions d'opération données (température, pression, etc.).

Il existe trois principaux types de sédimentation : la sédimentation diluée ou libre, la sédimentation par floculation et la sédimentation retardée<sup>(40)(41)</sup>. La sédimentation diluée s'effectue dans une suspension solide à basse concentration où les particules peuvent sédimenter individuellement sans interaction avec les particules voisines. Ainsi, chaque particule possède une vitesse de sédimentation qui lui est propre et qui est indépendante des autres particules. Pour la sédimentation par floculation, la suspension est encore diluée mais les particules sont floculées durant cette période. Conséquemment, les particules s'agglomèrent, deviennent plus volumineuses et ont une vitesse de sédimentation plus élevée. Le dernier type de sédimentation se produit lorsqu'il y a une concentration en matières solides élevées et où la vitesse de sédimentation est reliée à la concentration plutôt qu'à la taille des particules<sup>(38)</sup>.

### 3.1.1 Sédimentation libre

La décantation d'une particule non floculée dans une suspension diluée peut être décrite par l'emploi des lois classiques de la sédimentation établies par Newton et Stokes. Considérant une particule seule, la vitesse de sédimentation de cette dernière sera uniquement fonction des propriétés du fluide qui l'entoure et des caractéristiques de la particule. La Figure 3.1 illustre les trois forces régissant la particule ;  $F_g$  (force gravitationnelle),  $F_b$  (force de flottabilité) et les  $F_f$  (force de friction).



**Figure 3.1 – Forces influençant la vitesse de sédimentation d'une particule**

L'équation générale du mouvement d'une petite particule solide dans un liquide peut être obtenue en appliquant la seconde loi de Newton<sup>(37)(38)(40)(42)</sup> :

$$m \frac{dv_s}{dt} = F_g - F_b - F_f \quad \text{(Équation 3.1)}$$

où  $v_s$  est la vitesse de sédimentation de la particule,  $m$  est la masse de la particule et  $t$  le temps.

La force de gravité agissant sur la particule se définit comme suit :

$$F_g = \rho_{particule} \times Vol \times g \quad (\text{Équation 3.2})$$

où  $\rho_{particule}$  est la densité de la particule,  $Vol$  le volume de la particule et  $g$  est l'accélération gravitationnelle.

La force de flottabilité due à la poussée d'Archimède s'exprime comme suit :

$$F_b = \rho_{fluide} \times Vol \times g \quad (\text{Équation 3.3})$$

où  $\rho_{fluide}$  est la densité du fluide.

La force de friction (ou de traînée) est fonction de la géométrie de la particule, telle que sa taille et sa forme, de sa vitesse ainsi que de la densité et la viscosité du fluide. Elle se décrit comme suit :

$$F_f = \frac{C_d \times A \times \rho_{fluide} \times v_s^2}{2} \quad (\text{Équation 3.4})$$

où  $C_d$  est le coefficient de traînée, qui est fonction du nombre de Reynolds et de la forme de la particule, et où  $A$  est l'aire projetée d'une particule dans la direction de l'écoulement. En substituant l'Équation 3.2, 3.3 et 3.4 dans l'Équation 3.1, il est possible d'obtenir une expression pour le comportement dynamique de la particule :

$$m \frac{dv_s}{dt} = g(\rho_{particule} - \rho_{fluide}) \times Vol - \frac{C_d \times A \times \rho_{fluide} \times v_s^2}{2} \quad (\text{Équation 3.5})$$

Lorsqu'une particule est immergée dans un fluide, cette dernière accélère jusqu'à ce que les forces de friction et de flottabilité exercées par le fluide neutralisent la force gravitationnelle sur la particule. La vitesse de sédimentation de la particule est alors constante car l'accélération est nulle. Cette vitesse est dite vitesse de sédimentation terminale. En simplifiant, l'Équation 3.5 devient :

$$v_s = \left( \frac{2g(\rho_{particule} - \rho_{fluide}) \times Vol}{C_d \rho_{fluide} \times A} \right)^{1/2} \quad (\text{Équation 3.6})$$

Dans le cas d'une particule sphérique de diamètre  $d$ , le volume et l'aire de la particule sont :

$$Vol = \frac{\pi d^3}{6} \quad \text{et} \quad A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{Équation 3.7})$$

Il est alors possible de simplifier le terme  $Vol/A$  de l'Équation 3.6 et l'équation générale de la vitesse de sédimentation d'une particule sphérique devient :

$$v_s = \left( \frac{4g(\rho_{particule} - \rho_{fluide})d}{3C_d \rho_{fluide}} \right)^{1/2} \quad (\text{Équation 3.8})$$

Le nombre de Reynolds qui caractérise la nature du débit autour de la particule est défini comme suit :

$$Re = \frac{d \rho_{fluide} v_s}{\mu} \quad (\text{Équation 3.9})$$

où  $\mu$  est la viscosité du fluide et  $d$  le diamètre de la particule.

Le coefficient de traînée  $C_d$  caractérise la résistance qu'oppose un fluide à un corps en mouvement par rapport à ce fluide. Le coefficient de traînée est fonction du nombre de Reynolds et de la forme de la particule, mais il peut aussi être exprimé comme étant le ratio de  $\tau_{stress}$ , force par unité de surface de la particule, mesurée perpendiculairement à la direction du mouvement, par rapport à l'énergie cinétique du liquide.

$$C_d = \frac{2 \tau_{stress}}{\rho_{fluide} v_s^2} \quad \text{(Équation 3.10)}$$

La valeur du coefficient de traînée diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Différents travaux<sup>(38)(40)(42)</sup> ont permis d'établir des équations pour décrire la relation entre  $C_d$  et  $Re$ . Ainsi, pour un nombre de Reynolds inférieur à 1, la relation peut être approximée comme  $C_d \approx 24/Re$ . Cette approximation provient de la résolution des équations de Navier-Stokes qui décrivent le comportement d'un élément infinitésimal dans un fluide incompressible. Pour  $1 < Re < 10^3$ ,  $C_d$  équivaut à :

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34 \quad \text{(Équation 3.11)}$$

Pour des valeurs de  $Re$  entre  $10^3$  et  $10^5$ , la valeur de  $C_d$  est constante à 0,44. Cependant, la valeur de  $C_d$  chute brusquement à 0,1 lorsque  $Re$  atteint  $10^5$ . Cette baisse de la valeur de  $C_d$  s'explique par le changement du régime d'écoulement autour de la particule sphérique qui passe de laminaire à turbulent.

En générale, dans une sédimentation diluée, le nombre de Reynolds est habituellement inférieur à 1. Ainsi, en remplaçant  $C_d$  par la relation  $24/Re$  dans l'Équation 3.8, la vitesse de sédimentation de la particule devient :

$$v_s = \frac{g}{18\mu} (\rho_{particule} - \rho_{fluide}) d^2 \quad \text{(Équation 3.12)}$$

Cette équation est connue comme étant la loi de Stokes appliquée à des particules sphériques<sup>(38)(41)</sup>. Il y a deux restrictions à l'applicabilité de la loi de Stokes. La première restriction concerne les effets de la concentration qui doivent être faibles afin que le comportement de sédimentation des particules ne soit pas affecté par la présence des particules voisines. La seconde restriction concerne le nombre de Reynolds qui devrait être inférieur à 0,2. Si ces deux conditions sont respectées, la sédimentation est appelée sédimentation libre et l'Équation 3.12 peut être utilisée. La sédimentation libre est caractérisée par une interface non distincte entre les solides qui sédimentent et le liquide surnageant (suspension nuageuse qui s'éclaircit avec le temps) et par une couche de sédiment à la base du récipient. Lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 0,2 mais inférieur à 1, le coefficient de traînée est exprimé par la loi de Newton :

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re\right) \quad \text{(Équation 3.13)}$$

### 3.1.2 Sédimentation par floculation

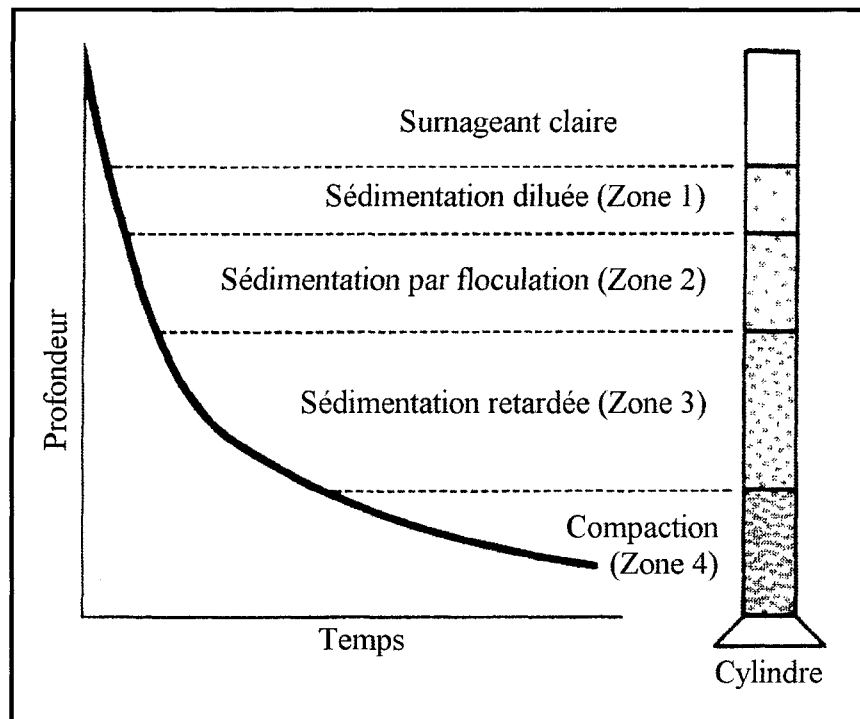
La sédimentation par floculation consiste à la formation d'agrégats de différentes tailles et de vitesses de sédimentation variables suite aux collisions entre particules. Ce type



de sédimentation est privilégié par les procédés de séparation industriels puisqu'il permet de réduire le temps de sédimentation. Plusieurs facteurs influencent la floculation, tels que la profondeur du bassin de sédimentation, le gradient de vitesse dans le système, la concentration de particules, le type de flocculant utilisé et bien d'autres<sup>(40)</sup>. Il n'existe pas de modèle théorique adéquat permettant de prédire le taux de floculation dans les suspensions<sup>(40)(42)</sup>. Des essais de sédimentation par floculation en laboratoire sont nécessaires afin de caractériser le comportement de la suspension à l'étude.

### ***3.1.3 Sédimentation retardée***

En général, la sédimentation varie en fonction de l'augmentation de la concentration<sup>(38)(43)(44)(45)</sup>. Lorsque cette dernière est suffisamment élevée, les particules ne sédimentent plus de façon individuelle et s'influencent les unes les autres (les particules commencent à interagir entre elles). Conséquemment, les particules individuelles passent ainsi dans une zone de transition où se forment des agrégats. À partir d'une certaine concentration, les agrégats sédimentent en masse, formant une interface (ligne de boue) entre le liquide claire surnageant et les particules solides qui sédimentent. Ce type de sédimentation, nommée sédimentation retardée, est observé dans les essais en test du cylindre. À titre d'exemple, le test du cylindre est utilisé dans les industries de l'aluminium afin d'étudier la floculation d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer. La Figure 3.2 présente les phases de sédimentation en test du cylindre ainsi qu'une analogie avec la théorie de Kynch<sup>(38)(43)</sup> (variation de la hauteur de l'interface en fonction du temps).



**Figure 3.2 – Schéma des phases de sédimentation en test du cylindre**

Ainsi, la zone 1 de la Figure 3.2 représente la sédimentation diluée où les particules sédimentent librement. La zone 2 schématise la sédimentation par floculation où les particules commencent à s'agglomérer entre elles par collision. La zone 3 se reporte à la sédimentation retardée où, considérant la quantité de particules, il se forme une interface entre le liquide surnageant et le solide qui sédimente. Lors de la sédimentation, une couche de particules commence à se déposer à la base du cylindre. Les particules dans cette région sont physiquement très proches les unes des autres. Au fur et à mesure de la sédimentation, d'autres couches de sédiment s'accumuleront successivement. La concentration en solide des couches varie en fonction de leur emplacement ; ainsi, les couches les plus concentrées se retrouvent au fond du cylindre et les couches de faibles concentrations se situent sur la

partie supérieure du sédiment. Par conséquent, la zone de compaction (zone 4) est l'endroit où le poids des particules des couches supérieures comprime les couches inférieures.

Chacune des zones est reportée sur la courbe d'un graphique qui illustre le changement de type de sédimentation dans un cylindre en fonction du temps. C'est la théorie de Kynch<sup>(38)(43)</sup> qui est utilisée pour décrire les phénomènes de sédimentation apparaissant en test du cylindre. Cette dernière stipule que la vitesse de sédimentation d'une couche de particules est uniquement fonction de sa concentration et ne dépend pas des couches en amont ou aval, ainsi :

$$G = U \times C \quad \text{(Équation 3.14)}$$

où  $G$  est défini comme étant le flux de particules,  $U$  la vitesse de sédimentation d'une couche de particule et  $C$  la concentration des solides.

### 3.2 Technique de traitement préliminaire

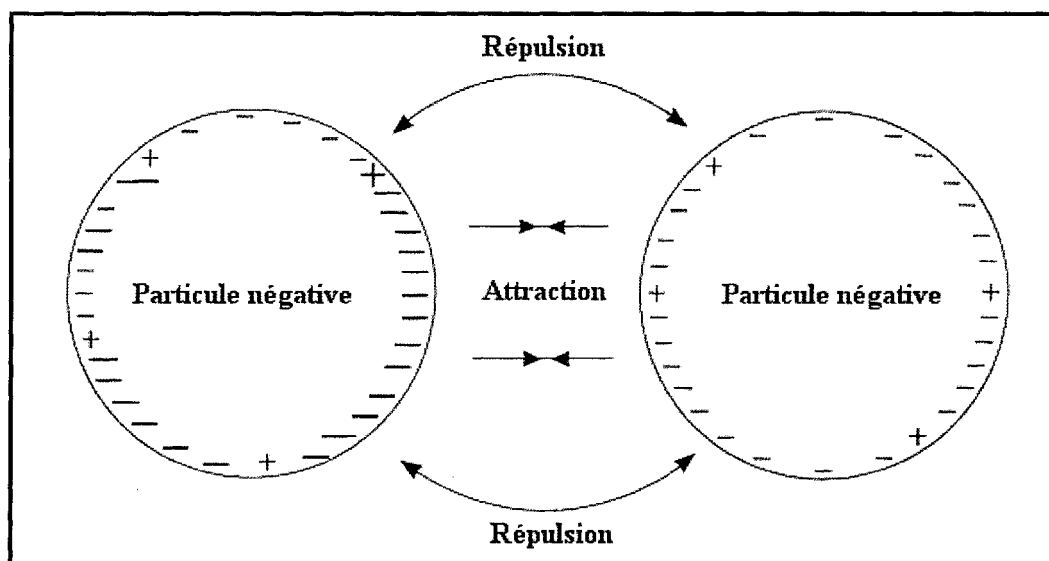
Les matières en suspension, telles que les suspensions de boue rouge, sont généralement constituées de particules solides de tailles variables. Les plus grandes sédimentent par gravité dans un temps respectable. Par contre, les plus petites particules, telles que les colloïdes, sédimentent beaucoup trop lentement pour des opérations industrielles. La présence de colloïdes dans la suspension influence donc la performance du procédé mais aussi la qualité du produit de fabrication. C'est pourquoi l'utilisation de techniques de traitement préliminaire à la sédimentation, comme la floculation et la

coagulation, permet de modifier le comportement du milieu afin de faciliter la séparation solide/liquide.

### ***3.2.1 Stabilité des suspensions colloïdales***

Le terme colloïde est généralement employé pour caractériser les particules plus petites que 1  $\mu\text{m}$ . Ces petites particules proviennent de différents types de matériaux, tels que les argiles, les sables, les limons et bien d'autres. Le temps de décantation de ces particules est calculé par la loi de Stokes<sup>(37)(38)(40)(46)</sup> (Équation 3.12). Étant donné que la vitesse de sédimentation des particules est proportionnelle au carré de leur diamètre (plus la particule est petite plus le temps de décantation est long), il est facile de concevoir que l'agglomération de deux particules pourrait faciliter la séparation solide/liquide.

Les phénomènes de surface jouent un rôle important dans la stabilité des suspensions<sup>(46)</sup>. Ces phénomènes de surface entre en jeu lors de la rencontre de deux particules sphériques, tel que démontré sur la Figure 3.3. Les particules de cette figure possèdent des charges résiduelles négatives. La charge résiduelle de la particule peut être positive ou négative mais, dans la nature, les particules sont plus souvent chargées négativement (comme les particules de bauxite). L'origine de cette charge peut provenir d'adsorption préférentielle d'ions petits et fortement polarisables, d'une ionisation des groupes chimiques sur la paroi de la particule ou d'ions formés par réaction entre la particule et le liquide<sup>(37)(47)</sup>.

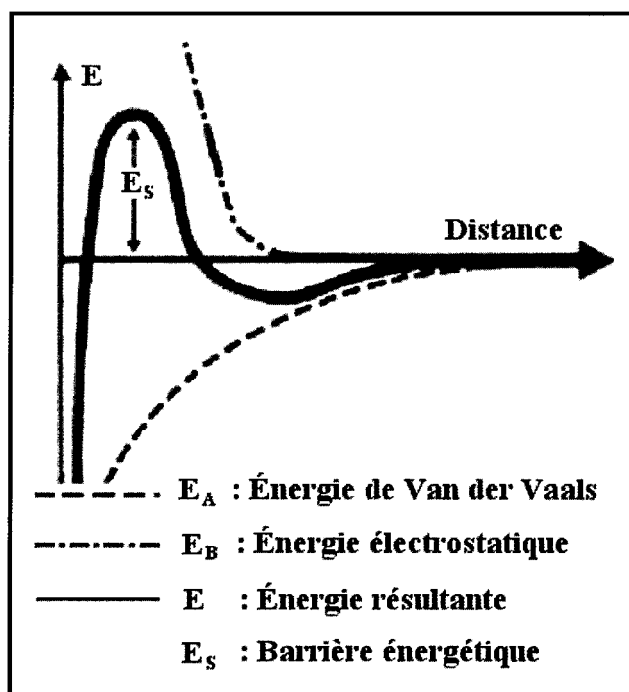


**Figure 3.3 – Rencontre de deux particules de même charge**

Il y a deux types de force qui influencent l'agglomération des particules. Les forces d'attraction, telles que les forces de London et Van der Waals qui sont de courte portée. Si deux particules viennent en contact, ces forces favorisent l'agglomération des particules en un flocon stable qui se comporte comme une particule unique. Ces forces dépendent de la structure et de la forme des colloïdes ainsi que de la nature du milieu ( $E_A$ )<sup>(48)</sup>. Le second type de forces agissant sur les particules colloïdales sont les forces de répulsion électrostatique. Ces forces sont liées aux charges superficielles des colloïdes ( $E_B$ ) et tendent à produire la rupture des agglomérats. Conséquemment, la stabilité d'une suspension colloïdale dépend donc du bilan énergétique ( $E$ ) des forces d'attraction et de répulsion :

$$E = E_A + E_B \quad (\text{Équation 3.15})$$

Cette relation est schématisée sur la Figure 3.4.

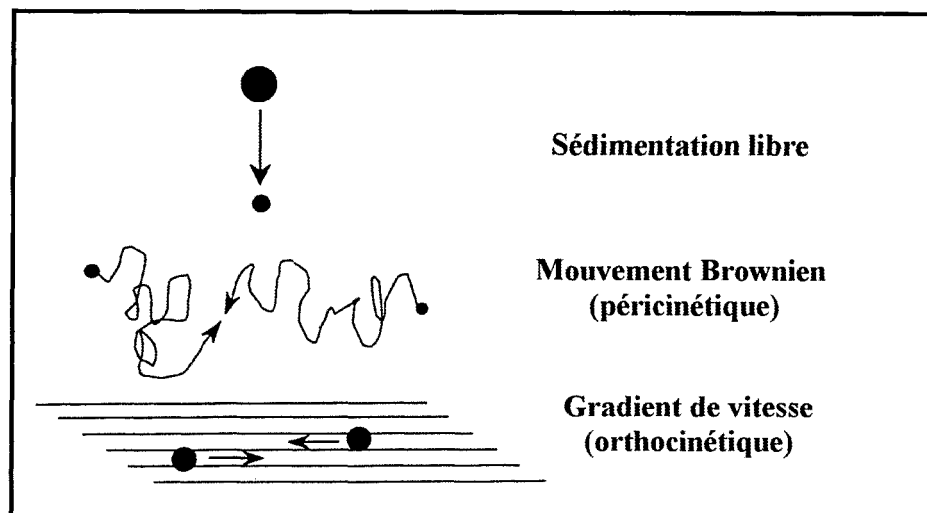


**Figure 3.4 – Stabilité d'une suspension colloïdale**

Ainsi, comme la portée des forces d'attraction et de répulsion est différente, leur résultante engendre généralement un maximum répulsif, appelé barrière d'énergie ( $E_s$ ). Si l'énergie résultante ( $E$ ) dépasse la barrière d'énergie ( $E_s$ ), la suspension est déstabilisée. Pour y parvenir, il faut donc diminuer les forces de répulsion électrostatique entre les particules. La théorie de la double couche et la mesure du potentiel Zéta sont généralement utilisées pour décrire et expliquer les interactions des charges surfaciques des particules<sup>(28)(46)(47)</sup>.

### 3.2.2 Agrégation

Le processus d'agrégation résulte de collisions entre les particules suite à la diminution des charges sur celles-ci. Les énergies cinétiques nécessaires aux collisions des particules peuvent être obtenues spontanément par mouvement Brownien (péricinétique) et par sédimentation différentielle, lorsqu'une grosse particule rattrape dans sa chute une particule plus lente. Elles peuvent également être communiquées délibérément aux particules par la présence de gradients de vitesse dans le milieu (orthocinétique). La Figure 3.5 illustre les trois principaux types de collision entre les particules.



**Figure 3.5 – Mécanismes de collisions des particules**

### 3.2.3 La coagulation

Il a déjà été mentionné que les particules d'une suspension sont principalement chargées négativement et se repoussent entre elles. La coagulation est le processus par lequel les particules en suspension sont déstabilisées par neutralisation des charges

surfaciques répulsives, dû à l'ajout d'un réactif chimique (coagulant), pour former des agrégats qui sédimentent à une vitesse satisfaisante. De façon générale, la coagulation se produit soit par ajout d'électrolytes, soit par adsorption.

### ***3.2.3.1 Coagulation électrostatique***

Dans ce cas, il y a ajout d'électrolytes à la suspension afin d'augmenter la force ionique et ainsi dissiper les forces de répulsion par compression de la double couche<sup>(28)</sup>. Lorsque l'épaisseur de la double couche est suffisamment petite, les particules peuvent s'approcher assez près les unes des autres pour que les forces d'attraction de Van der Waal puissent causer l'agrégation.

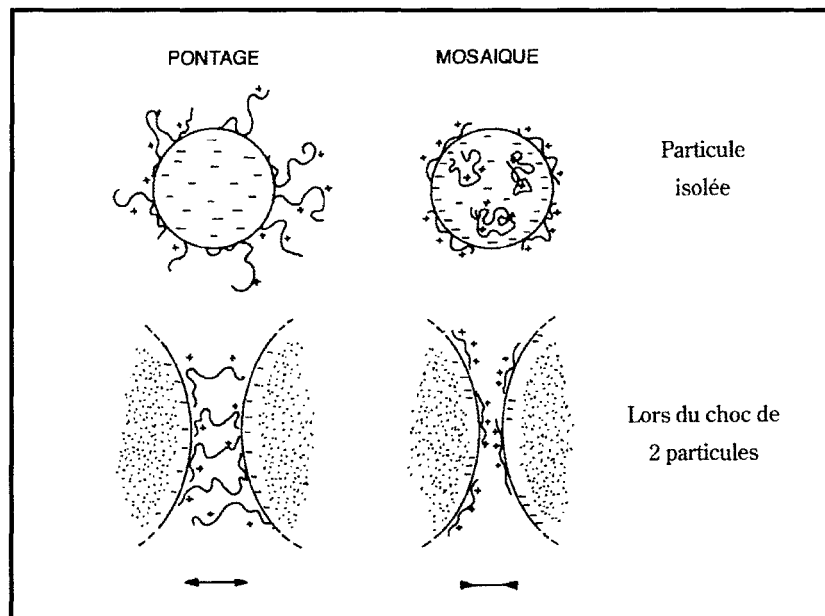
### ***3.2.3.2 Coagulation par adsorption***

Les produits adsorbés sont soit les ions mêmes du coagulant, soit leurs produits de réaction avec le milieu liquide. La coagulation adsorptive est nettement plus efficace que la coagulation électrostatique. Ainsi, l'adsorption d'ions de signe contraire neutralise les particules. Cependant, une concentration élevée de coagulant peut résulter à une réversion de charge, due à l'adsorption excessive d'ions, ayant pour résultat de restabiliser les colloïdes<sup>(47)(49)</sup>.



### 3.2.4 La floculation

La floculation n'est qu'un cas particulier de la coagulation par adsorption, où le coagulant est un polyélectrolyte ou une macromolécule<sup>(47)</sup>. Ainsi, le flocculant est une molécule polymérique à longues chaînes portant de nombreux groupes chargés. Les flocculants peuvent être d'origine naturelle ou synthétique. Il est possible de les classer selon leur poids moléculaire et leur densité de charge. Il existe trois principales classes de flocculant : les non-ioniques, anioniques et cationiques. Le choix d'un polymère est influencé par les caractéristiques de la boue, la distribution des particules et le pH de la suspension<sup>(37)</sup>. La floculation optimale des particules se produit lorsque  $\pm 50 \%$  de la surface des particules est couverte par le polymère. La seconde moitié de l'aire non couverte par le polymère est ainsi disponible pour permettre à d'autres particules d'être adsorbées par neutralisation de charge ou par pontage inter-particulaire (Figure 3.6).



**Figure 3.6 – Floculation par pontage et par neutralisation de charges « mosaïque »**

### ***3.2.4.1 Neutralisation de charges***

Ce mécanisme consiste à déstabiliser les particules en suspension par une neutralisation des charges sur les particules par un groupement actif du polyélectrolyte. L'adsorption du polyélectrolyte se fait de façon aléatoire formant ainsi une mosaïque de zones positives et négatives sur la particule (Figure 3.6). Ainsi, lorsque deux particules se rencontrent, les sites non neutralisés d'une particule se lient aux sites neutralisés d'une autre particule pour former des agrégats (flocs). Ce mécanisme d'interaction peut agir simultanément avec le mécanisme de pontage inter-particulaire.

### ***3.2.4.2 Pontage inter-particulaire***

Le pontage inter-particulaire consiste en la formation de ponts ou de série de ponts entre les particules. En effet, pour être efficace, la molécule de polymère doit contenir un groupement fonctionnel capable d'interagir avec la surface de la particule colloïdale<sup>(38)(48)</sup>. Ainsi, lorsque le polymère vient en contact avec la particule, certains de ces groupements s'adsorbent à la surface de la particule, laissant le reste de la molécule étendue dans la solution. Si une seconde particule entre en contact avec cette molécule étendue (polymère), il se produit un complexe particule-polymère-particule où le polymère agit comme un pont entre les particules. Les liens inter-particulaires augmentent la taille des flocs favorisant ainsi une sédimentation plus rapide.

### 3.2.4.3 Étapes de réaction de la floculation

La floculation peut être considérée comme une séquence d'étapes de réaction<sup>(50)</sup> (Figure 3.7). Initialement, les molécules (chaînes) de polymère se lient avec les particules en suspension. Par la suite, ces particules activées s'agglomèrent avec d'autres particules activées pour former des microflocs. Les flocs sont ensuite formés par l'association de ces microflocs. Un niveau d'agitation adéquat est nécessaire pour permettre la formation de ces flocs. L'agitation permet de disperser le polymère et les particules activées à travers la suspension afin d'augmenter le taux de collision entre les particules activées. Par contre, un niveau d'agitation trop élevé entraîne une diminution de la taille des flocs (bris des plus gros flocs). Donc, un taux de cisaillement optimal, pour un dosage et une concentration donnés, exprime un état d'équilibre entre la formation et la désagrégation des flocs<sup>(50)</sup>.

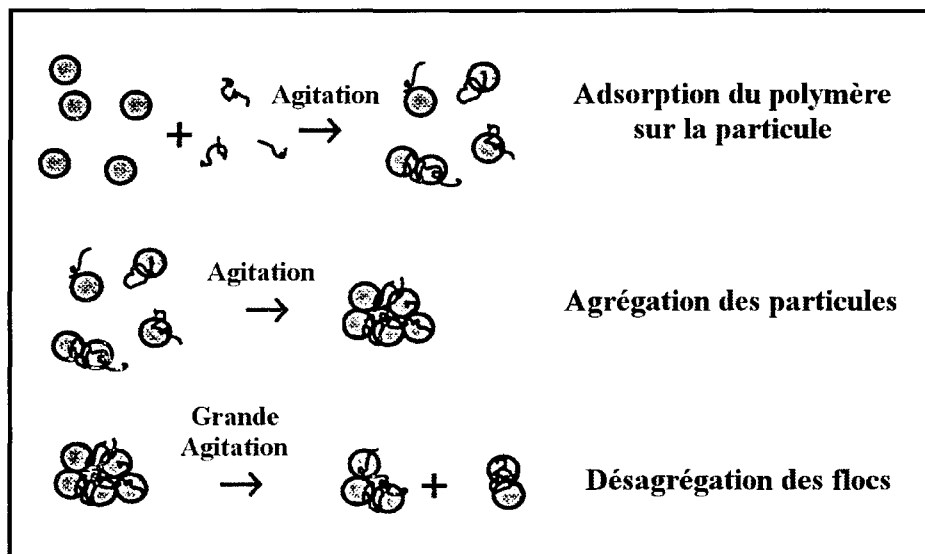


Figure 3.7 – Étapes de la floculation

#### **3.2.4.4    *Floculation dans le procédé Bayer***

Dans le procédé Bayer, la floculation s'effectue sous des conditions particulières. En effet, la liqueur Bayer est hautement caustique, possède une force ionique très élevée et elle peut contenir une grande variété d'impuretés. Généralement, les polymères à haut poids moléculaire sont utilisés pour floculer les suspensions de boue rouge et de liqueur Bayer. Les principaux flocculants utilisés sont des copolymères d'acrylamide et d'acrylate de sodium. La principale fonction du groupement amide est de s'adsorber sur les particules au moyen de ponts hydrogène tandis que le groupement acrylate assure un bon étalement de la chaîne de polymère en solution. L'adsorption du polymère sur la surface des particules dans ces conditions présente une situation particulière puisque les charges de surface des particules en suspension sont considérées négatives, dues à la causticité élevée du milieu, et le polymère utilisé est généralement très anionique (peu de groupement amide). Ainsi, les particules et le polymère possèdent les mêmes charges. Des travaux de recherche<sup>(51)(52)</sup> ont démontré que l'adsorption d'un polymère anionique dans des conditions où le pH et la force ionique sont élevés est possible grâce à la présence des cations tels que le sodium. En effet, l'augmentation de NaCl (concentration en électrolyte) de la liqueur Bayer faciliterait l'adsorption du polyacrylate à pH élevé. Ainsi, les ions sodium s'adsorbent préférentiellement sur les particules de charges négatives, changeant la charge de surface et facilitant le pontage inter-particulaire.

### 3.3 Approche globale de la sédimentation

#### 3.3.1 *Équipements de sédimentation*

Les équipements de sédimentation sont classifiés en deux catégories ; clarification du liquide surnageant ou épaissement du solide à la sousverse. Ces deux modes d'opération sont indirectement reliés, mais les équipements utilisés sont assez différents selon l'objectif principal recherché. Dans le cadre du présent projet, l'emphasis est principalement axée sur l'épassement du solide en reproduisant l'écoulement d'un décanteur de boue rouge. Ainsi, l'objectif principal d'un décanteur est d'obtenir une concentration en solide élevée à la sousverse en maintenant une concentration en matières particulières relativement faible à la surverse<sup>(37)(38)(53)</sup>. Évidemment, les concentrations en matières particulières retrouvées à la surverse des décanteurs sont souvent beaucoup plus élevées que celles des clarificateurs. Il existe une grande variété de géométries de décanteurs utilisées selon les besoins et objectifs recherchés. De plus, il est assez commun de retrouver des décanteurs en plusieurs points d'un même procédé. En effet, tout comme dans le procédé Bayer, des décanteurs sont utilisés pour la digestion de la bauxite, la séparation solide/liquide, le lavage des boues rouges, etc.

Au cours des dernières années, on observe une avancée technologique assez importante au niveau de la décantation. En effet, des améliorations technologiques sont observées sur tous les aspects de la décantation, telles que l'utilisation et la modification des méthodes de prétraitements préliminaires, la géométrie des décanteurs et des râdeaux

utilisés, l'ajout de puits d'alimentation, etc. Peu importe les changements apportés, les industries ont pu ainsi augmenter de façon considérable le rendement des décanteurs actuels en réduisant ou modernisant la géométrie des nouveaux décanteurs.

### 3.3.2 Théorie de sédimentation dans les décanteurs

Jusqu'à maintenant, les concepts physiques de la décantation ainsi que les méthodes de prétraitement préliminaires ont été décrits. Ces principes sont à la base du phénomène de sédimentation dans les décanteurs. En effet, le comportement de sédimentation dans les décanteurs est fonction du degré d'interaction entre les particules et varie donc avec la concentration en solide à l'intérieur de celui-ci<sup>(54)</sup>. Ce type de comportement se rapproche beaucoup de la sédimentation retardée observée en cylindre (section 3.1.3) et expliquée à l'aide de la théorie de Kynch<sup>(38)(43)</sup>. La Figure 3.8 présente les zones d'opération traditionnelles retrouvées dans un décanteur de boue rouge<sup>(54)</sup>.

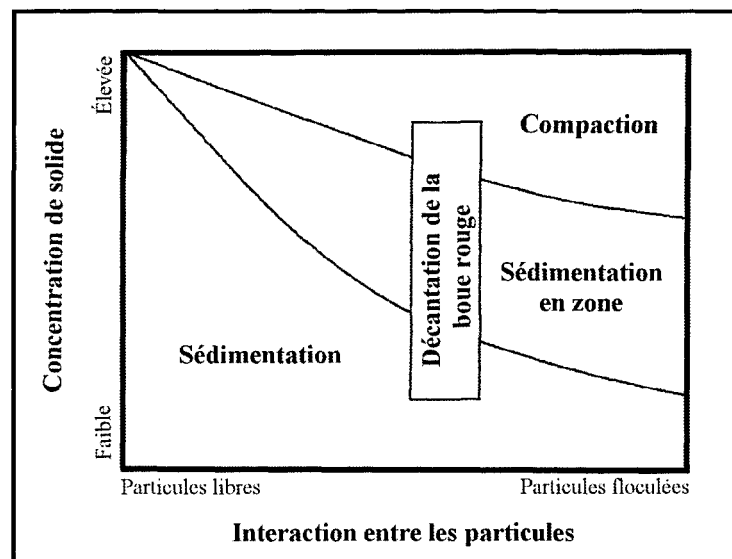


Figure 3.8 – Classification des types de sédimentation

Dans un processus de décantation, les matières en suspension sédimentent sous l'action de la gravité et par l'utilisation de prétraitements préliminaires (floculation et/ou coagulation). Ainsi, les particules de boue rouge sédimentent d'abord librement dans le décanteur puis elles entrent dans une zone de sédimentation retardée lorsque la concentration en particule devient importante, pour finalement être compactées à la base du décanteur. Plusieurs chercheurs ont travaillé à l'analyse de la sédimentation et des forces de compression appliquées aux particules. Entre autre, Coe et Clevenger<sup>(44)</sup> ont développé l'une des premières méthodes de mesures des caractéristiques de sédimentation des suspensions solide/liquide. En fait, ils ont observé la présence de deux régimes de sédimentation (sédimentation libre à la section 3.1.1 et la sédimentation retardée section 3.1.3) et ont ainsi constaté que la vitesse de sédimentation est fonction de la concentration en particules. Ils sont donc les précurseurs de la méthode expérimentale du test du cylindre. Kynch<sup>(38)(43)</sup>, Talmage et Fitch<sup>(45)</sup> ont amélioré cette méthode expérimentale pour la rendre adéquate et utilisable dans l'analyse de la vitesse de sédimentation d'un décanteur.

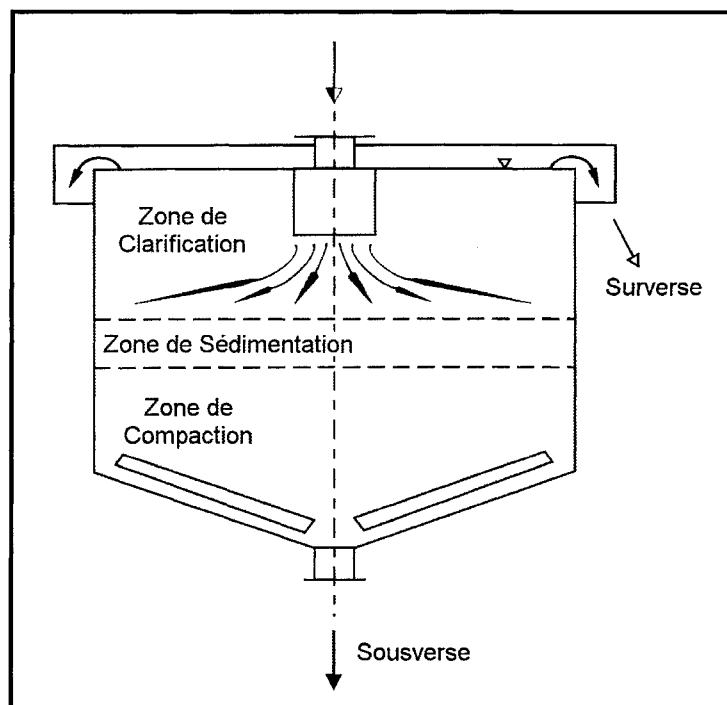
À l'époque du développement de la méthode du test du cylindre, la floculation n'était pas très bien contrôlée et seuls quelques additifs chimiques permettaient de favoriser l'agglomération des fines particules. Ainsi, les vitesses de sédimentation observées étaient très faibles et par conséquent, les décanteurs se devaient d'être immenses afin de laisser le temps aux agglomérats de sédimenter. Dans les années 1960, l'efficacité des polymères synthétiques comme agents de floculation de la boue rouge a été reconnue. Ces polymères ont ainsi permis d'améliorer la vitesse de sédimentation ainsi que la clarté de la liqueur

Bayer<sup>(55)</sup>. Au cours des années 1980, l'ajout d'un mécanisme de râteau a été une autre amélioration notable apportée à la compréhension du processus de décantation<sup>(53)(56)</sup>. Basé sur l'ensemble de ces procédures expérimentales, méthodes de corrélations et combiné aux essais expérimentaux à l'échelle industrielle, il a été possible de développer des facteurs de design pour calculer les paramètres de conception des décanteurs.

### ***3.3.2.1 Zones de décantation***

Tel que mentionné précédemment, le processus de décantation est décrit par une transition entre les trois principales zones de sédimentation. Le comportement de chacune de ces zones est généralement mesuré et étudié par des essais en laboratoire et peut être influencé par la géométrie du décanteur. La première zone est celle de la sédimentation libre (section 3.1.1). La seconde est associée à la sédimentation retardée (section 3.1.3), où les particules sédimentent plutôt en masse, et elle dépend de la concentration solide, du taux de floculation et de la densité de particule. Lorsque mesurée, elle est caractérisée par l'apparition d'une ligne de sédimentation entre le surnageant clair et le solide qui sédimente. Cette zone est généralement moins importante par rapport aux deux autres et est souvent négligée lors de la conception des décanteurs. Finalement, la troisième zone représente la compaction. Dans cette zone, la vitesse de sédimentation est limitée par l'accumulation des couches de particules sur le fond du décanteur et le sédiment est compacté par des forces de compression exercées par le poids des particules et du liquide au-dessus. La Figure 3.9 illustre les principales zones de sédimentation observées dans un décanteur.





**Figure 3.9 – Zones de sédimentation dans un décanteur idéal**

#### **3.3.2.1.1 La compaction**

Lorsque les particules sont floculées, elles forment des agrégats plus ou moins compacts qui sédimentent jusqu'à atteindre la zone de compaction du décanteur. Par conséquent, les agglomérats entraînent avec eux une certaine quantité de liquide qui est emprisonnée dans la couche de sédiment. Lorsque la fraction volumique de solide dans le sédiment atteint un certain seuil limite, les particules interagissent entre elles pour former un réseau solide. Les forces de cohésion de ce réseau sont influencées par la fraction volumique de solide, la grandeur des interactions entre les particules et de la formation et destruction de pores permettant d'évacuer le liquide hors du réseau solide. L'accumulation successive de sédiment à la base du décanteur favorise l'augmentation de la pression

appliquée sur le réseau qui est faiblement compensée par une augmentation de la pression interstitielle du fluide à l'intérieur de celui-ci<sup>(37)(38)(54)(57)</sup>. Avec le temps, la force de gravité induite par l'accumulation de poids provoque l'expulsion d'une partie du liquide et un réarrangement des grains de particules (modification du réseau). Le phénomène de compaction se traduit donc par une diminution du niveau/volume de sédiment associée à une augmentation de sa densité. En somme, la compaction dépend de l'équilibre entre la force de gravité associée au poids du sédiment, la force de traînée associée à la viscosité du liquide se déplaçant entre les particules et à la force de compression du solide induite par le réseau formé (résistance du réseau face à une force appliquée, telle la force de gravité).

Différentes mesures permettent d'évaluer la compaction d'un décanteur de boue rouge. Tout d'abord, le pourcentage solide ou fraction massique (% W) de la boue présente le rapport entre le poids de la fraction solide de la boue et le poids total de cette boue (Équation 3.16). La compaction peut également être définie comme étant la différence entre la fraction solide finale et initiale (Équation 3.17). Ou encore, le taux de compaction ( $T_c$ ) peut être défini comme la variation de cette compaction par unité de temps (Équation 3.18).

$$\%W = \frac{\text{Poids boue sèche}}{(\text{Poids boue sèche} + \text{Poids liquide})} \times 100 \quad \text{(Équation 3.16)}$$

$$\text{Compaction} = \%W_{\text{final}} - \%W_{\text{initial}} \quad \text{(Équation 3.17)}$$

$$T_c = \frac{\text{Compaction}}{\Delta t} \quad \text{(Équation 3.18)}$$

#### *3.3.2.1.1.1 Facteurs influençant la compaction*

Plusieurs facteurs peuvent influencer la compaction de la boue rouge. La taille et la forme des particules ont un effet évident, car plus les particules sont petites, plus l'espace entre les particules pour permettre l'accumulation de liquide est petit. Les forces de cohésion inter-particulaires influencent également le phénomène de compaction. Plus ces forces sont élevées, moins le réseau est déformable et par conséquent plus longtemps le fluide y est retenu. Bien évidemment, les forces de cohésion sont influencées par la présence et le type de flocculant utilisé. Par ailleurs, la hauteur de sédiment influence également la compaction puisque la pression exercée sur le sédiment augmente avec la quantité/hauteur de sédiment. D'autres facteurs, tels que la différence de densité entre le liquide et le solide et le temps de repos du sédiment, influencent le phénomène de compaction.

### *3.3.3 Paramètres de conception des décanteurs*

Les paramètres de conception des décanteurs ont souvent été élaborés à partir d'études préliminaires effectuées en test du cylindre en supposant que :

- La vitesse de sédimentation est seulement fonction de la concentration solide.
- La boue d'alimentation se retrouve dans la zone de sédimentation libre du décanteur.
- La plus grande portion du décanteur est utilisée pour la sédimentation des agrégats.

La capacité d'un décanteur s'exprime généralement par sa surface spécifique « Aire ». Elle représente la surface de décanteur requise pour sédimenter une masse unitaire de solide par unité de temps. Les unités utilisées sont en  $\text{m}^2$  / tonne / jour. Bien évidemment, il est important de considérer plusieurs facteurs lors de la conception des décanteurs, puisque le processus de séparation solide/liquide s'en trouve affecté<sup>(53)(54)</sup>.

Ainsi, on doit considérer :

- Le ratio de solide/liquide présent dans la suspension.
- La distribution granulométrique et la forme des particules solides.
- La densité du solide et du liquide.
- La présence de flocculant ou de coagulant.
- La viscosité du liquide.
- La température.
- Les méthodes de prétraitement préliminaires utilisées.
- Les caractéristiques de mouillage des particules.
- L'utilisation et la configuration du mécanisme de transport des particules « râteau ».
- La disposition géométrique du décanteur.
  - Type et emplacement du puits d'alimentation.
  - Emplacement de la sousverse.
  - Emplacement de la surverse.

En plus de ces facteurs, il est essentiel de respecter certaines conditions lors du design du décanteur. Ainsi, la vitesse de sédimentation des solides dans la zone de

sédimentation libre doit être supérieure à la vitesse de remontée du liquide surnageant. Si cette condition n'est pas satisfaite, alors les particules solides sont entraînées vers le haut du décanteur et s'écoulent par la surverse. Donc, le diamètre minimal du décanteur est fonction de cette condition. Des facteurs d'échelles sont généralement appliqués pour tenir compte de cette condition ainsi que pour considérer d'autres variables telles que la non-uniformité de la distribution des particules le long du diamètre du décanteur.

Un autre paramètre de design très important est le temps de résidence. Ce dernier caractérise le temps passé par les particules solides à l'intérieur du décanteur. Il est fonction de plusieurs variables, telles que la granulométrie des particules, de la minéralogie, du dosage de flocculant, de la rhéologie, etc. Pour un décanteur de boue rouge, les temps de résidence sont généralement de l'ordre de quelques heures. Règle générale, le temps de résidence est estimé en fonction du ratio de la hauteur du lit de boue et du diamètre du décanteur (volume de boue) versus le débit à la sousverse.

En somme, deux paramètres importants de design des décanteurs sont l'aire de celui-ci ainsi que sa profondeur. L'aire du décanteur est principalement associée à la vitesse de sédimentation des agrégats tandis que la profondeur est reliée au temps requis pour obtenir la compaction maximale.

### **3.3.4 *Décanteurs***

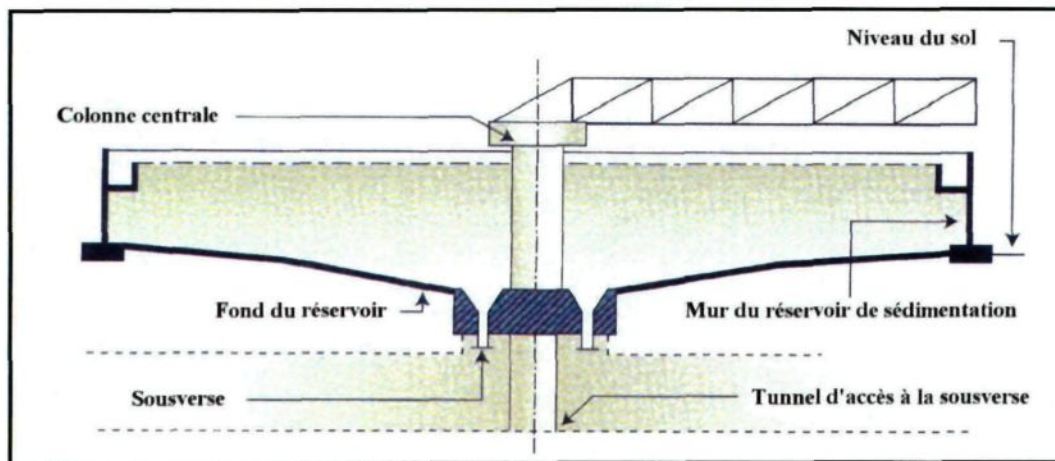
Il existe une grande variété de décanteurs. La plupart se présentent sous forme circulaire / cylindrique. Ils sont fréquemment classifiés selon le mode d'opération des râteaux ou en fonction du type de support du mécanisme d'entraînement du râteau. On distingue quatre grandes classes<sup>(53)</sup> : à pont surélevé, à colonne centrale, par traction et à caisson. Tous les décanteurs utilisés dans l'industrie métallurgique sont essentiellement composés des mêmes composantes soit : le réservoir de sédimentation, un puits d'alimentation, une surverse et une sousverse. Si le décanteur est muni d'un râteau, il est également accompagné d'un mécanisme d'entraînement et d'un support. Le choix du type de décanteur ainsi que sa configuration est basé sur les expériences passées et les essais préliminaires en laboratoire. Le choix doit être pratique afin de minimiser les problèmes potentiels et les temps d'arrêt en plus d'être le moins onéreux tant du point de vue de sa construction que de son opération.

D'un point de vue opératoire, les suspensions sont préalablement floclées puis amenées à l'intérieur du décanteur via le puits d'alimentation. Ce dernier est généralement centré, mais peut également être décentré selon les besoins. Il permet de mélanger adéquatement le flocculant et les particules solides afin de favoriser la formation d'agrégats et de disperser ces derniers de façon plus ou moins uniforme à l'intérieur du décanteur. La suspension floclée tombe ainsi jusqu'à ce qu'elle rencontre une zone de densité similaire. Ensuite, la concentration en solide augmente avec la profondeur du décanteur. Une cavité cylindrique est généralement aménagée sur les pourtours du décanteur afin de recueillir la

surverse. Un mécanisme de râteau, positionné sur l'axe central du décanteur et tournant très lentement, est utilisé pour aider au transport de la boue vers la sousverse en plus de favoriser le phénomène de compaction.

### 3.3.4.1 *Décanteurs à colonne centrale*

Le mécanisme d'entraînement de ces décanteurs est situé sur une colonne centrale. Un pont peut être ajouté pour relier la colonne au mur du décanteur afin d'en faciliter l'accès. De plus, le pont peut servir de support pour l'alimentation du décanteur. Ce type d'installation est utilisé pour les très grands décanteurs. La Figure 3.10 présente une illustration d'un décanteur à colonne centrale surmonté d'un demi pont.



**Figure 3.10 – Décanteur à colonne centrale**

#### **3.3.4.2    *Décanteurs à pont surélevé***

Le mécanisme d'entraînement de ce décanteur est localisé au centre, sur un pont, au-dessus du décanteur. Le pont est supporté à même le décanteur ou par une structure externe. On retrouve des ponts surélevés pour des décanteurs de 25 à 30 m de diamètre.

#### **3.3.4.3    *Décanteur à traction***

Ce type de décanteur<sup>(58)</sup> possède une colonne centrale utilisée comme pivot pour la rotation du râteau. Le mécanisme d'entraînement est constitué de roues motorisées guidées par un rail installé sur le pourtour du décanteur. Ce mécanisme est surtout utilisé dans les grands décanteurs (200 m).

#### **3.3.4.4    *Décanteurs à caisson***

Le décanteur à caisson est similaire à celui à colonne centrale sauf qu'une cavité est aménagée sur l'axe central (caisson) afin d'abriter les pompes de sousverse du décanteur. Ce type de décanteur est surtout utilisé pour de très grand diamètre.

#### **3.3.5    *Mécanisme de râteaux***

Les râteaux sont les composantes mobiles du décanteur. Tel que spécifié précédemment, ils sont utilisés pour aider au transport physique de la boue vers la sousverse<sup>(59)</sup>. En effet, dans une configuration idéale, les râteaux doivent transporter autant de matière sinon plus que le débit de la pompe de sousverse<sup>(58)</sup>. De plus, les râteaux agissent sur la boue en facilitant l'épaississement de celle-ci. Tout comme pour les



décanteurs, il existe une très grande variété de râteaux regroupée en quatre classes : à simple tuyau, à profil bas, à support (boîte ou triangulaire) et à balancement « Swing lift ». Peu importe le type de râteau utilisé, celui-ci est essentiellement constitué de deux bras ainsi que de lames. Le nombre de lames ainsi que la configuration de celles-ci dépend des besoins recherchés et du matériel à transporter. Il existe deux principales configurations des lames : complémentaire et non-complémentaire<sup>(59)</sup>. Dans le premier cas, les lames de chaque bras sont disposées afin qu'elles soient intercalées les unes dans les autres. Ainsi, pour une rotation du râteau, la boue est transportée par deux lames (une sur chaque bras). Dans le second cas, les lames sont installées aux mêmes endroits sur les deux bras et la boue n'est transportée qu'une fois par rotation. Mentionnons que la configuration complémentaire est généralement utilisée pour le transport des matériaux lourds tandis que la configuration non-complémentaire pour le transport de matériaux plus légers<sup>(58)</sup>. Notons également que les lames peuvent être courbées ou droites et qu'elles sont généralement orientées avec un angle d'inclinaison spécifique selon les besoins<sup>(58)(60)(61)(62)</sup>.

### ***3.3.5.1 Râteaux à simple tuyau***

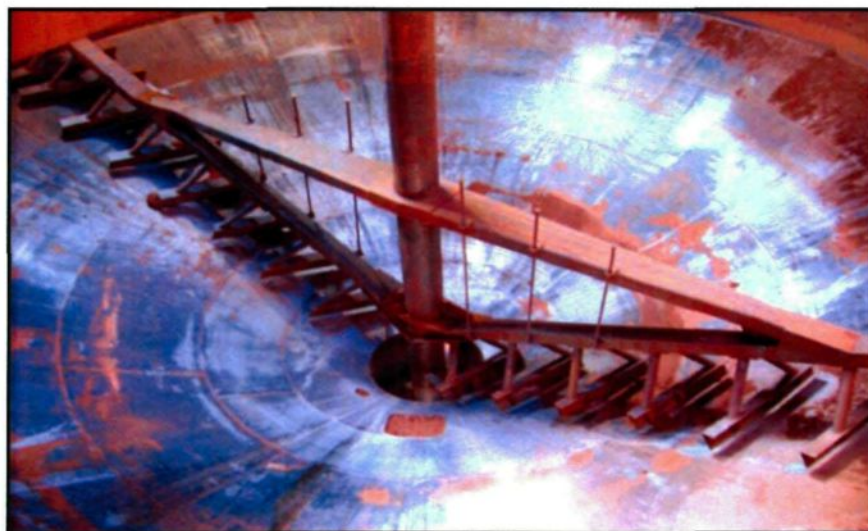
Ce râteau est constitué d'un simple tuyau sur lequel sont attachées les lames. Spécifions que le profil du tuyau peut être variable (triangulaire, rectangulaire, rond, etc.). Ce type de râteau est essentiellement utilisé dans des décanteurs de petites tailles. La Figure 3.11 présente un exemple de râteau à simple tuyau.



**Figure 3.11 – Râteau à simple tuyau**

#### **3.3.5.2 Râteaux à profil bas**

Ce type de râteau est construit afin de présenter un faible profil du râteau à la boue afin de minimiser le contact de la structure et de la boue. Ce râteau est surtout utilisé pour minimiser les forces de frottement et ainsi réduire le couple appliqué à la structure. La Figure 3.12 présente un exemple de râteau à profil bas.



**Figure 3.12 – Râteau à profil bas**

### **3.3.5.3    *Râteaux à support***

Les râteaux à support augmentent la rigidité des longs râteaux grâce à des supports ajoutés sous forme de boîte triangulaire ou rectangulaire. Les supports ajoutés sont creux afin de ne pas augmenter le poids du râteau. Malheureusement, ces structures facilitent la création d'amas de boue surtout dans le cas des suspensions floculées.

### **3.3.5.4    *Râteaux à balancement « swing lift »***

Ces râteaux sont supportés et entraînés à l'aide de câbles. Le bras de ce râteau est articulé à l'arbre de rotation et peut dans certains cas être bougé ou remonté (d'où le terme balancement). Ce type de râteau a été développé par l'industrie minière pour le traitement de la boue rouge. En effet, il est assez commun d'observer la formation d'une couche de sédiment (entartrage) sur les bras du râteau. Cette accumulation de poids (parfois jusqu'à 100 tonnes) réduit l'efficacité du râteau. Ainsi, ce râteau permet de réduire la surface sur laquelle il peut y avoir accumulation de boue.

### **3.3.5.5    *Piquets d'épaississement***

Il a été démontré que l'ajout de piquets (extensions verticales partant du bras du râteau vers la surface du lit de boue) peut aider à l'épaississement de la boue rouge. En effet, les piquets améliorent l'évacuation de la liqueur Bayer piégée dans la boue, favorisant ainsi l'augmentation de la densité et de la concentration solide à la sousverse. Les piquets peuvent être utilisés sur tous les types de râteaux sauf sur celui à balancement<sup>(63)</sup>. Il est possible d'observer des piquets d'épaississement sur la Figure 3.12.

### **3.3.5.6    *Action du râteau sur le transport de la boue***

Tel que mentionné précédemment, les râteaux sont utilisés dans le processus de séparation solide/liquide pour aider au transport physique de la boue vers la sousverse du décanteur et pour aider à l'épaississement<sup>(59)</sup>. Ainsi, la géométrie du râteau doit être efficace pour qu'il y ait suffisamment de boue qui soit transportée à la sousverse du décanteur, afin d'éviter la création de chemins préférentiels ou « rathole » dans le lit de boue. Bien que l'action du râteau soit importante dans le processus de séparation solide/liquide, il existe très peu de documentations décrivant les effets de celui-ci sur l'écoulement du lit de boue<sup>(59)</sup>.

Une étude portant sur les effets de la vitesse et de la hauteur des lames sur la performance des râteaux a été effectuée par Gunthert<sup>(61)</sup>. En effectuant des essais sur cinq décanteurs, il a démontré que l'augmentation de la hauteur des lames et de leurs vitesses améliore le transport de la boue. D'autre part, Albertson et Okey<sup>(60)</sup> ainsi que Warden<sup>(62)</sup> ont utilisé des modèles d'équations pour étudier le transport de la boue pour des râteaux ayant des lames recourbées. Malheureusement, leurs modèles ne tiennent pas compte de la nature non-newtonienne de la boue. De plus, les modèles d'équations possèdent des constantes empiriques qui doivent être déterminées expérimentalement ou mathématiquement, ce qui rend difficile leur utilisation<sup>(59)</sup>. Par ailleurs, une analyse<sup>(63)</sup> effectuée par CFD (Computational Fluid Dynamics) d'un décanteur à fond plat a étudié l'effet de l'orientation des lames et de leur géométrie sur le transport de la boue. Il a été démontré que

l'augmentation de la surface des lames améliore l'efficacité de la sousverse (plus de boue est acheminée vers le centre).

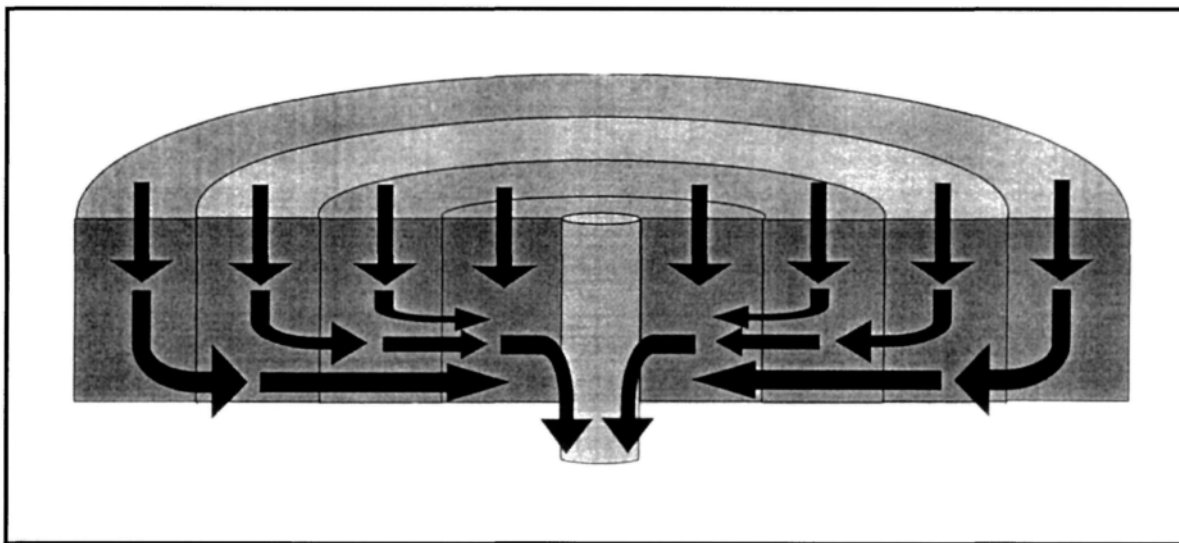
L'une des études les plus représentatives de l'effet du râteau sur l'écoulement de la boue a été réalisée expérimentalement sur un décanteur à petite échelle<sup>(59)</sup> et reproduite par une analyse CFD. Le déplacement de la boue par un râteau à deux bras, chacun possédant 9 lames dans une configuration complémentaire et orienté à 30°, dans un fluide transparent de comportement rhéologique similaire au sédiment retrouvé dans les lits de boue a été simulé. En injectant une quantité d'encre dans une position donnée, il a été possible d'observer le transport de la boue en fonction du temps. Il a été observé que la boue voyage de la périphérie du décanteur vers la sousverse sous forme de mouvements en spirale. Ainsi, lorsque la lame rencontre la boue, celle-ci est séparée en deux portions d'écoulement. Celle à l'intérieur de la lame correspond à la portion de l'écoulement dirigé vers la sousverse. Celle à l'extérieur de la lame correspond à la portion d'écoulement qui est poussée au-dessus de la lame et qui est bougée radialement vers l'extérieur (selon la conservation de la masse). Des mesures de vitesse et des analyses de simulation ont également démontré que le matériel a tendance à s'agglomérer derrière la lame du râteau en plus d'être poussé devant la lame vers la sousverse. Ainsi, si le taux de transport du râteau dépasse la capacité de pompage de la sousverse, alors la boue est recirculée vers l'arrière, dans une couche supérieure à la zone de transport du râteau. En effet, chaque lame pousse plus de matériel vers la sousverse créant ainsi une accumulation de matériel qui se déplace alors vers le haut. Ce type de déplacement est particulièrement observé lorsque les lames du

râteau sont de mêmes dimensions. Le mouvement de recirculation est considéré comme une perte d'efficacité du râteau puisque de l'énergie est utilisée pour recirculer de la boue dans une direction opposée à la sousverse.

Mentionnons également<sup>(59)</sup> que pour des lames de tailles similaires, celles situées à l'extrémité du râteau se déplacent plus rapidement et transportent plus de matériel que les lames situées près du centre. De plus, la dimension des lames influence le taux de transport de la boue. Ainsi, plus la lame est petite, plus le temps pour atteindre la sousverse est long et moins le transport de la boue est efficace. D'autres facteurs influencent également le transport de la boue mais de façon moins prononcée tels que la vitesse de rotation du râteau et l'angle d'orientation des lames.

Une autre étude<sup>(64)</sup> s'appuie sur un principe de transport similaire. Selon leur modèle, chaque lame balaye un volume de boue annulaire. Ainsi, le lit de boue est séparé en un réseau concentrique de volumes élémentaires annulaires. Le mouvement de la boue s'effectuerait d'un volume annulaire à l'autre grâce à un mouvement radial produit par les lames du râteau et est régi par un bilan de transfert de masse. En plus du mouvement radial, chaque volume annulaire est alimenté par flux massique de solide provenant de la portion supérieure du lit de boue (portion où les lames du râteau n'interagissent pas) et induite par le puits d'alimentation. En considérant un flux massique constant et une distribution uniforme du lit de boue (surface lisse), le temps de résidence associé à chacun des volumes annulaires diffère en fonction de son emplacement. Ainsi, les volumes annulaires situés aux

proximités des parois du décanteur ont un temps de résidence plus long que ceux près de la sousverse. La Figure 3.13 illustre les trajectoires de la boue dans un lit de boue selon l'hypothèse des volumes annulaires.



**Figure 3.13 – Trajectoires de la boue dans le lit de boue**

### ***3.3.6 Propriété des substances en présence***

Afin de prédire et de comprendre les comportements de sédimentation et de déplacement des boues rouges dans un décanteur, il est important de connaître les propriétés physiques des substances en présence. Dans le cas du procédé Bayer, deux principales substances sont considérées : la liqueur Bayer et la boue rouge.

#### ***3.3.6.1 Liqueur Bayer***

La liqueur Bayer est le liquide présent dans le processus de séparation solide/liquide associé au procédé Bayer. Elle est un fluide de nature visqueuse et sa concentration en

caustique varie en fonction de son emplacement en usine (décanteur ou laveur). Elle est principalement constituée d'eau à laquelle est ajoutée de la soude caustique (NaOH) et des carbonates de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Les concentrations sont respectivement de 230 à 300 g/L et de 25 à 30 g/L. La liqueur contient également de l'alumine en solution selon l'étape du procédé d'où elle provient. De plus, de nombreuses impuretés issues de la digestion de la bauxite sont aussi présentes mais en faible concentration. La concentration des éléments dissous de même que la température affectent la densité et la viscosité de la liqueur. Les propriétés physiques de la liqueur dans ce projet sont celles associées au dernier stage de lavage de la boue rouge, ainsi :

| Densité ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ) | Viscosité (Pa s) |
|--------------------------------------|------------------|
| 1022 - 1078                          | 0,0023 – 0,0030  |

**Tableau 3.1 – Propriétés physiques de la liqueur Bayer au dernier stage de lavage**

### 3.3.6.2 *Boue rouge*

La boue rouge est le résidu épaissi évacué à la sousverse des décanteurs du procédé Bayer, et de densité élevée. En fait, c'est une suspension concentrée en particules solides dans de la liqueur Bayer. La rhéologie de la boue rouge est généralement évaluée préalablement par des essais sur des suspensions de composition similaire. Mentionnons d'abord qu'elle est considérée comme un fluide non newtonien, c'est-à-dire qu'une valeur de viscosité ( $\mu$ ) différente est obtenue pour chacune des contraintes appliquées ( $\tau_{stress}$ ).

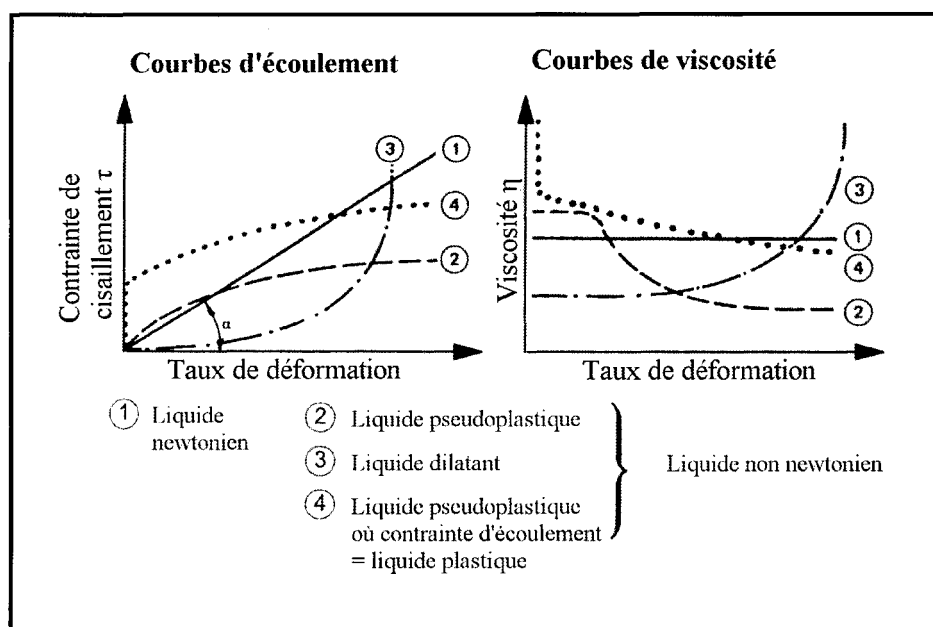


Ainsi, telles que décrite par Isaac Newton<sup>(28)(57)(65)(66)</sup>, la loi fondamentale décrivant le comportement en écoulement d'un fluide idéal est présentée à l'Équation 3.19.

$$\mu = \frac{\tau_{stress}}{\gamma} \quad \text{(Équation 3.19)}$$

Où  $\gamma$  représente le taux de déformation ou gradient de vitesse, c'est-à-dire la diminution de la vitesse le long d'une épaisseur donnée. Dans le cas d'un fluide non newtonien, il n'existe pas de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement  $\tau_{stress}$  et le gradient de vitesse  $\gamma$ . Dans ce cas, la viscosité dynamique  $\mu$  dépend non seulement des propriétés thermodynamiques du fluide mais également de la viscosité dynamique apparente  $\mu_a$  du milieu (valeur de la viscosité pour une température et un gradient de vitesse donné). Lorsque  $\mu_a$  tend vers zéro, le fluide se comporte comme un fluide parfait (non visqueux).

Dans la plupart des cas, la connaissance d'une loi générale liant les contraintes  $\tau_{stress}$  aux gradients de vitesse  $\gamma$  est trop complexe pour être explicitée. Il est alors permis d'utiliser des lois de comportement. Ces lois, qui sont d'origines expérimentales, ne sont valables que dans le domaine pour lequel elles ont été établies et ne doivent pas être extrapolées. La Figure 3.14 illustre les courbes d'écoulement typiques des fluides newtoniens et non newtoniens.



**Figure 3.14 – Courbes d'écoulement pour différents types de matériels**

Les boues rouges sont classées comme étant un fluide rhéofluidisant plastique<sup>(57)</sup>. En effet, pour que les boues rouges entrent en écoulement, il faut dépasser un seuil de contrainte minimum appelé contrainte d'écoulement (résistance opposée au cisaillement « yield stress »). Ainsi, lorsque la boue rouge est au repos, il se forme une structure inter-particulaire suffisamment rigide pour empêcher tout mouvement (à bas  $\gamma$ ). Le seuil de contrainte correspond à la force nécessaire pour déformer et provoquer l'écoulement de la boue rouge. À partir de ce point, les forces de cohésion (de type Van der Waals) sont brisées et la structure inter-particulaire est déformée et orientée dans le sens de l'écoulement. Bien évidemment, la viscosité de la boue rouge diminue avec l'augmentation du gradient de vitesse. De plus, la valeur de la contrainte d'écoulement varie avec

l'historique de la boue : concentration initiale en matière particulaire, degré de floculation, type d'agitation subie, etc.

Plusieurs modèles rhéologiques peuvent être utilisés pour exprimer mathématiquement la courbe d'écoulement des boues rouges, tels que Hershel-Bulkley, Bingham et la loi de puissance. Pour des raisons historiques, le modèle Hershel-Bulkley est le plus utilisé chez Rio-Tinto-Alcan.

$$\tau_{stress} = \tau_y + K \times \gamma^b \quad (\text{Équation 3.20})$$

L'équation précédente présente le modèle d'Hershel-Bulkley où  $\tau_y$  est la contrainte d'écoulement,  $K$  est l'indice de consistance et  $b$  est un indice d'écoulement.

### **3.3.6.2.1 Facteurs influençant la rhéologie de la boue rouge**

#### **3.3.6.2.1.1 La concentration solide**

Tel que mentionné précédemment, plusieurs facteurs peuvent influencer la rhéologie de la boue rouge. L'un des facteurs les plus importants est la concentration en solide de la suspension de boue rouge. En effet, la viscosité de la boue varie proportionnellement avec la concentration en solide. Ainsi, lorsque la concentration solide est élevée (densité de la boue  $\geq 1750 \text{ kg/m}^3$ )<sup>(57)</sup> la boue s'empile plus facilement tandis que pour de faibles valeurs, elle s'écoule et agit plutôt comme un fluide. Il est possible de déterminer de façon expérimentale une relation entre la viscosité de la boue et la contrainte de cisaillement. Ainsi, l'Équation 3.21<sup>(57)</sup> présente une expression semi-empirique pour

déterminer la viscosité de la boue rouge en fonction de la concentration solide sous différentes contraintes de cisaillement et où  $F_v$  représente la fraction volumique de la boue.

$$\mu = \frac{-0.1798 + 0.1798e^{19.12 F_v} + 0.003e^{22.609 F_v} \gamma^{\left(0.465 + \frac{0.03}{0.056 + F_v}\right)}}{\gamma} \quad (\text{Équation 3.21})$$

#### 3.3.6.2.1.2 Distribution granulométrique

La distribution granulométrique des particules solides (Annexe A) influence également la viscosité de la boue rouge. En effet, la boue rouge est constituée de toutes sortes de particules de diamètres variables. On y retrouve des particules de grande taille telle que des grains de sable et de petites particules comme les colloïdes et les argiles. Ainsi, la valeur du seuil d'écoulement est fonction de la composition de la bauxite initialement utilisée.

#### 3.3.6.2.1.3 La floculation

La floculation permet de créer des agrégats plus volumineux afin d'accélérer l'étape de sédimentation. Conséquemment, le flocculant a une incidence sur la rhéologie de la boue. La rhéologie varie en fonction du type de flocculant utilisé, de la quantité et de son degré d'interaction avec les particules. Plus la force de cohésion entre les particules floculés est grande, plus il est difficile de les séparer et plus le seuil d'écoulement critique est grand. Les Tableaux 3.2 et 3.3 présentent les valeurs de densité associées à des particules de boue floculées et non-floculées<sup>(54)</sup>.

| Densité (kg / m <sup>3</sup> ) | Diamètre médian (x 10 <sup>-6</sup> m) |
|--------------------------------|--|
| 3080                           | 2,7                                    |

**Tableau 3.2 – Propriétés physiques de la boue rouge non floculée**

| Densité (kg/m <sup>3</sup> ) | Diamètre médian (x 10 <sup>-6</sup> m) |
|------------------------------|--|
| 1292                         | 100 - 1670                             |

**Tableau 3.3 – Propriétés physiques de la boue rouge floculée**

## **CHAPITRE 4**

### **DISTRIBUTION DU TEMPS DE RÉSIDENCE**

La compréhension des écoulements à l'intérieur d'un décanteur de boue rouge peut s'avérer assez complexe, compte tenu des différents facteurs pouvant les influencer (débit variable, type de décanteur, nombre de phases en présence, précision des essais de traçage, etc.). Néanmoins, il est possible d'utiliser la théorie de la distribution du temps de résidence pour obtenir des informations de base afin de caractériser ces écoulements. Le présent chapitre traite donc des notions théoriques de la distribution du temps de résidence sous des conditions idéales et non-idéales ainsi que des différents modèles existants pour en permettre l'interprétation. Mentionnons également que les informations fournies dans la présente section proviennent principalement des livres de référence de Levenspiel<sup>(24)(67)(68)(69)(70)</sup> et de Fogler<sup>(25)</sup>.

#### **4.1 Distribution du temps de résidence**

Il est possible de décrire l'écoulement dans un système de différentes façons. Dans le cas d'un gaz, par exemple, il est possible d'étudier l'écoulement à l'échelle moléculaire et d'établir des règles qui régissent le mouvement des molécules. D'un autre point de vue, il

est possible de considérer l'ensemble des molécules de gaz et de développer des équations de bilan macroscopiques (ex : équation de Navier-Stokes) pour définir l'écoulement<sup>(71)</sup>. Ces deux approches sont utiles mais numériquement très complexes et elles nécessitent un important traitement mathématique. De plus, les informations obtenues sur le type d'écoulement via ces approches ne sont pas suffisantes pour les applications industrielles recherchées.

Une autre possibilité consiste à décrire l'écoulement d'une manière globale en utilisant le concept de distribution du temps de résidence. Ce dernier a été élaboré en 1953 par P.V. Danckwerts<sup>(22)</sup> et il permet de caractériser le temps de passage d'une particule donnée dans un décanteur. Bien évidemment, chacune des particules peut traverser le décanteur selon différents trajets. Par conséquent, la distribution du temps de résidence (« DTS » distribution du temps de séjour ou « RTD » residence time distribution) représente le temps requis pour qu'un ensemble de particules puissent traverser un décanteur. Ainsi, la RTD fournit des informations pertinentes sur le type d'agitation se produisant dans un décanteur et est donc un outil permettant de caractériser ce dernier. Plus spécifiquement, la RTD peut être utilisée pour diagnostiquer des problèmes opérationnels éventuels dans les décanteurs, tels que : la présence de volumes morts, de recirculation, de cheminements préférentiels et/ou pour évaluer l'efficacité de paramètres spécifiques à l'intérieur du décanteur (niveau d'agitation, débits d'alimentation, points d'injection, etc.).

## 4.2 Évaluation de la distribution du temps de résidence

La RTD est déterminée de façon expérimentale en injectant un traceur au temps  $t = 0$  et en mesurant la concentration du traceur à la sortie du décanteur en fonction du temps. Bien évidemment, le traceur utilisé doit respecter plusieurs conditions, dont être facilement détectable, posséder des propriétés physiques similaires au milieu simulé, être non-réactif, etc. Mentionnons qu'un traceur réactif est utilisé pour certains essais de traçage spécifiques, tel que pour le calcul de conversion chimique ou taux de conversion. La théorie relative à ce type de traceur est différente de celle associée au traceur non-réactif et n'est pas présentée. D'autre part, le mode d'injection du traceur peut s'effectuer de différentes façons : pulse, échelon, périodique ou aléatoire (Figure 4.1). Mentionnons que les modes plus couramment utilisés sont le pulse et l'échelon puisqu'ils sont plus faciles à analyser.

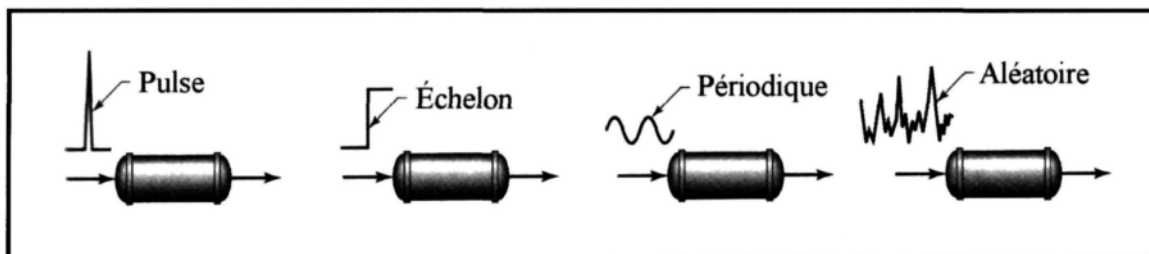


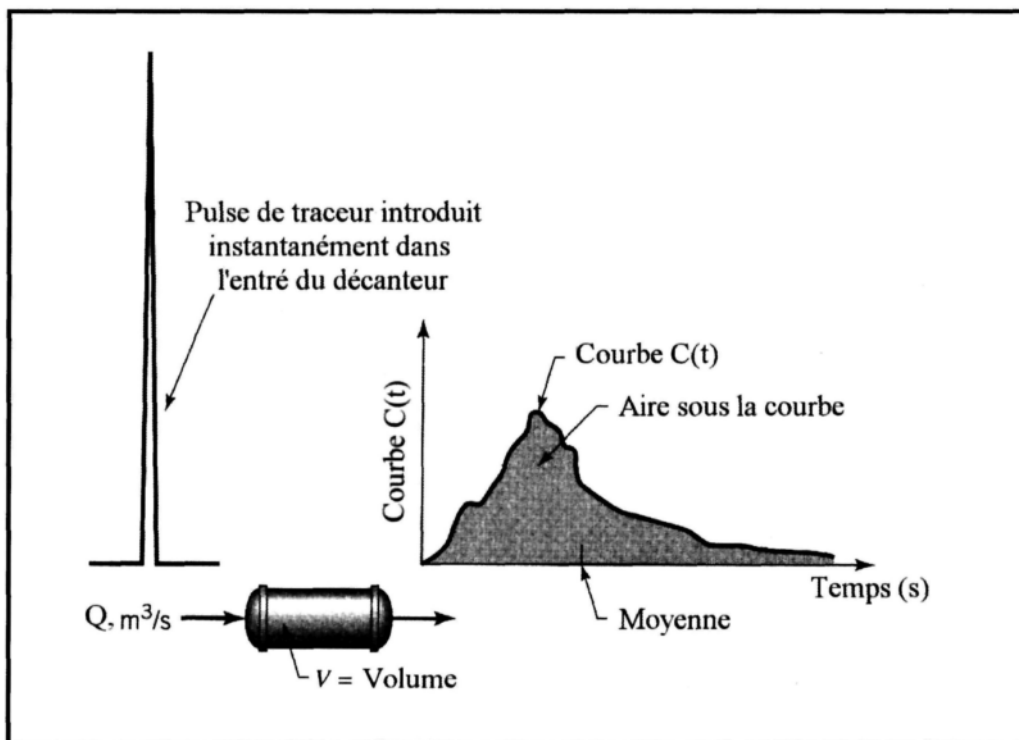
Figure 4.1 – Type d'injection de traceurs

### 4.2.1 Injection sous forme de pulse

L'injection sous forme de pulse est la méthode la plus couramment utilisée. Ainsi, la quantité totale de traceur ( $M_0$ ) est injectée en une seule fois et dans un laps de temps très court à l'entrée du système. Le signal brut de la concentration du traceur à la sortie du



décanteur en fonction du temps ( $t$ ) est appelé la courbe  $C(t)$ , telle que présentée sur la figure suivante.



**Figure 4.2 – Injection sous forme de pulse et courbe  $C(t)$**

Ce type de courbe est obtenu pour un système en conditions limites fermées (c'est-à-dire une entrée et une sortie donc aucune recirculation de matériel), telles que pour un décanteur de boue rouge. Plusieurs informations peuvent être obtenues de la courbe  $C(t)$ . Tout d'abord, en effectuant un bilan de matière sur la courbe  $C(t)$ , on obtient la quantité de traceur,  $\Delta M$ , qui quitte le décanteur entre le temps  $t$  et  $t + \Delta t$  :

$$\Delta M = C(t) Q \Delta t \quad \text{(Équation 4.1)}$$

où  $Q$  est le débit à la sousverse ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Il est également possible de retrouver la quantité initiale de traceur  $M_0$  en sommant toute la quantité de matériel évacuée entre le temps  $t = 0$  et  $t = \text{infini}$  via la courbe  $C(t)$  ainsi :

$$M_0 = \int_0^{\infty} Q C(t) dt \quad (\text{Équation 4.2})$$

Pour un débit  $Q$  à la sousverse constant, l'aire sous la courbe  $C(t)$  fournit une relation directe pour calculer  $M_0$  ainsi :

$$\text{Aire sous la courbe} = \int_0^{\infty} C(t) dt \cong \sum_i C_i \Delta t_i = \frac{M_0}{Q} \quad (\text{Équation 4.3})$$

La RTD est une fonction  $E(t)$  qui décrit de façon quantitative le temps de séjour des différents éléments à l'intérieur du décanteur et elle s'exprime en  $\text{sec}^{-1}$ . Pour l'obtenir, certaines transformations mathématiques s'imposent. Ainsi, en divisant par la quantité initiale de traceur injectée ( $M_0$ ), l'Équation 4.1 devient :

$$\frac{\Delta M}{M_0} = \frac{Q C(t)}{M_0} \Delta t \quad (\text{Équation 4.4})$$

Cette dernière représente la fraction de matériel (traceur) quittant le décanteur au temps  $t$  pendant un intervalle de temps  $\Delta t$ . Ainsi, pour une injection sous forme de pulse, on définit la courbe  $E(t)$  de la RTD à partir de la courbe  $C(t)$  selon :

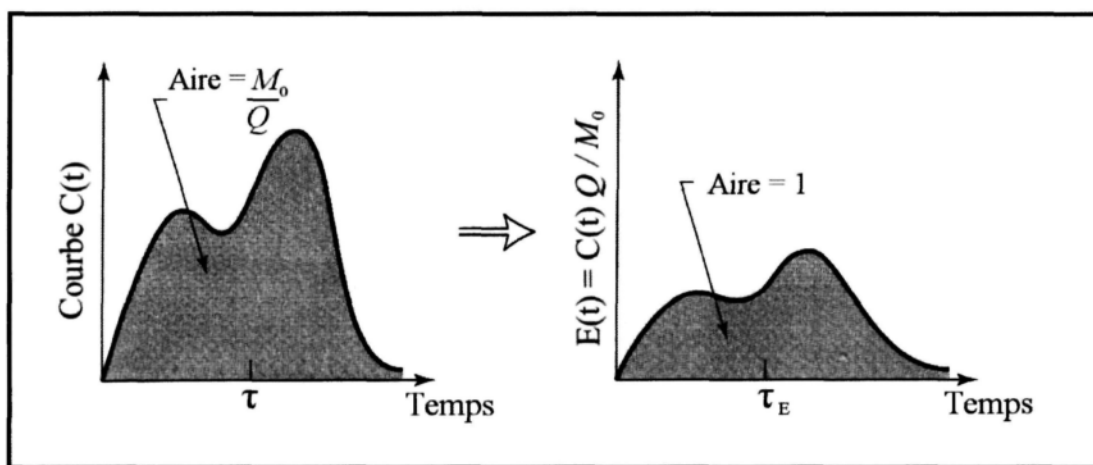
$$E(t) = \frac{Q C(t)}{M_0} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta M}{M_0} = E(t) \Delta t \quad (\text{Équation 4.5})$$

En combinant les Équations 4.3 et 4.5 et pour un débit à la sousverse constant, on retrouve que la courbe  $E(t)$  de la RTD équivaut à :

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (\text{Équation 4.6})$$

Il est d'usage de représenter la courbe  $E(t)$  de façon à ce que l'air sous la courbe soit égal à 1. Autrement dit, la distribution est normalisée afin d'en faciliter l'analyse. La Figure 4.3 présente un exemple de normalisation de la courbe  $C(t)$  en courbe  $E(t)$ .

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (\text{Équation 4.7})$$

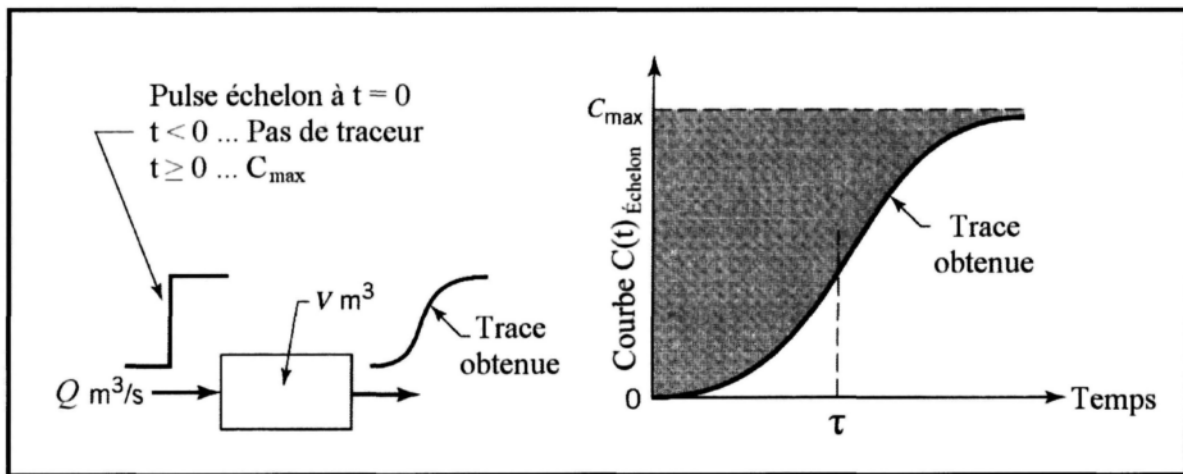


**Figure 4.3 – Transformation d'une courbe  $C(t)$  en courbe RTD**

#### **4.2.2 Injection sous forme d'échelon**

La fonction  $E(t)$  de la RTD est obtenue directement d'une courbe  $C(t)$  via un essai de traçage sous forme de pulse, tandis que l'injection d'un traceur sous forme d'échelon permet d'obtenir la fonction cumulative  $F(t)$  de la RTD. Considérons un système à l'équilibre, de volume  $V$  et de débit à la sousverse constant  $Q$ . Au temps  $t = 0$ , un débit

constant d'une concentration de traceur donnée «  $C_{\max}$  » est additionné à l'alimentation du système. Avant ce temps, la concentration  $C_0$  du traceur dans l'alimentation est nulle, ainsi lorsque  $t < 0$ ,  $C_0(t) = 0$  et à l'inverse lorsque  $t \geq 0$ ,  $C_0(t) = C_{\max}$ . Mentionnons que la concentration du traceur à l'alimentation est maintenue constante jusqu'à ce que la concentration de traceur à la sousverse soit indissociable de celle à l'alimentation ( $C(t)_{\text{échelon}} = C_{\max}$ ). La figure suivante présente le type de courbe associé aux essais de traçage avec injection sous forme d'échelon.



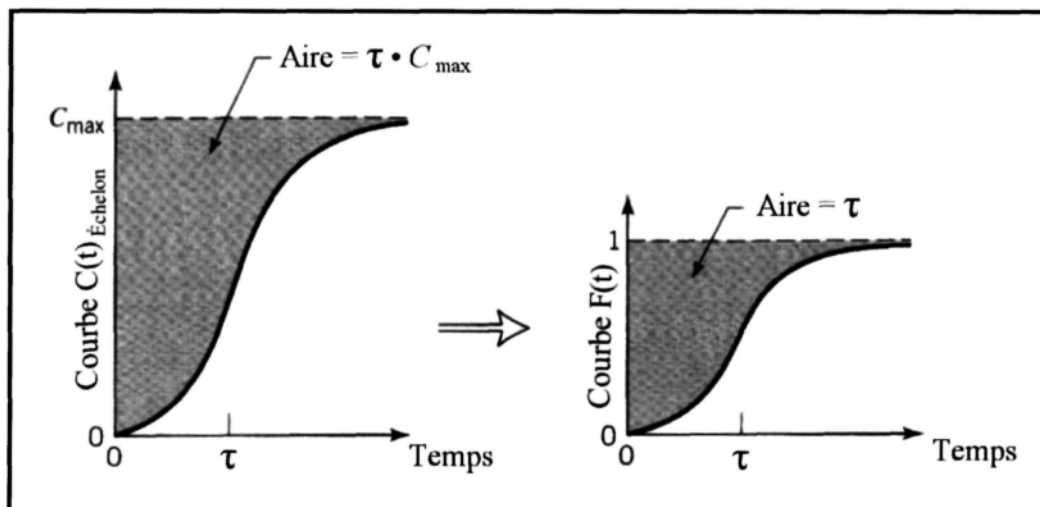
**Figure 4.4 – Injection sous forme échelon et courbe  $C(t)$  échelon**

Pour comprendre la figure précédente, imaginons que l'écoulement dans le décanteur est à l'équilibre et de couleur blanche. A  $t = 0$ , l'alimentation du décanteur devient rouge et par conséquent, la concentration de fluide rouge dans le décanteur augmente en fonction du temps. C'est ce que la courbe  $C(t)_{\text{échelon}}$  représente. La portion ombragée du graphique représente le liquide blanc et la portion non-ombragée le liquide rouge. La courbe permet d'établir les proportions présentes de chacun des fluides en un

temps donné. Ainsi, en utilisant l'équation de convolution<sup>3</sup> et en considérant que la concentration du traceur à l'alimentation est constante, il est possible de déterminer la courbe  $F(t)$  à partir de la courbe  $C(t)_{\text{échelon}}$  via l'équation suivante :

$$F(t) = \left[ \frac{C(t)_{\text{échelon}}}{C_{\max}} \right] = \int_0^t E(t') dt' \quad (\text{Équation 4.8})$$

La courbe  $F(t)$  est adimensionnelle (variation de la concentration entre 0 et 1). La Figure 4.5 présente un exemple de transformation de la courbe  $C(t)_{\text{échelon}}$  en courbe  $F(t)$  adimensionnelle de la RTD.



**Figure 4.5 – Transformation de la courbe  $C(t)_{\text{échelon}}$  en courbe  $F(t)$  adimensionnelle**

Mentionnons également qu'à l'aide d'un calcul simple, il est possible d'obtenir des informations pertinentes à l'analyse de la RTD. En effet, l'aire de la portion ombragée de la courbe  $C(t)_{\text{échelon}}$  peut s'exprimer par une relation mathématique assez simple :

<sup>3</sup> Voir la description de l'équation de convolution dans la section 4.3.5

$$\text{Aire ombragée} = C_{\max} \tau \quad (\text{Équation 4.9})$$

où le symbole  $\tau$  représente le temps de résidence<sup>4</sup> du décanteur. Pour un décanteur de volume  $V$  et de débit de sousverse  $Q$ , ce temps est défini par  $\tau = V/Q$ .

### 4.3 Caractéristiques de la distribution du temps de résidence

Tel que spécifié précédemment, la RTD permet d'obtenir des informations pertinentes sur les écoulements se produisant dans un décanteur. Elle permet également de caractériser le temps de résidence des différents éléments en présences dans le décanteur. Cependant, les informations obtenues varient en fonction du type d'injection de traceur utilisé (courbe  $E(t)$  ou  $F(t)$ ). Ainsi, il est important de comprendre les caractéristiques spécifiques et les mesures associées à chacune des courbes.

#### 4.3.1 Relation entre les courbes $E(t)$ et $F(t)$

La courbe  $E(t)$  caractérise le temps que chaque particule passe à l'intérieur du décanteur et elle représente donc la fraction du matériel qui quitte le décanteur par unité de temps à un temps donné. La  $F(t)$ , quant à elle, représente la fraction cumulative de traceur qui a quitté le décanteur à un temps  $t$ . Autrement dit, la portion cumulative du traceur qui a quitté le décanteur à la sousverse depuis le début de l'injection jusqu'au temps  $t$  sera égale à

---

<sup>4</sup> Une description plus détaillée du temps de résidence est faite à la section 4.3.2

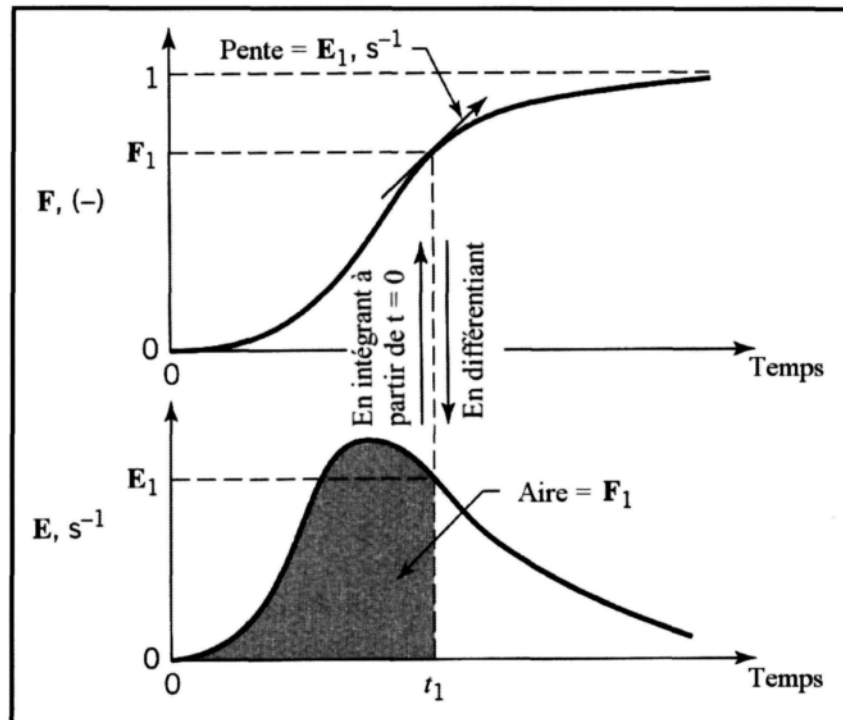
l'intégration de la courbe  $E(t)$  jusqu'à ce temps. En d'autres mots, la courbe  $F(t)$  et la courbe  $E(t)$  sont reliées par :

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad (\text{Équation 4.10})$$

De façon analogue, le complément  $1 - F(t)$  de la fonction  $F(t)$  est égal à :

$$\int_t^\infty E(t) dt = \int_0^\infty E(t) dt - \int_0^t E(t) dt = 1 - F(t) \quad (\text{Équation 4.11})$$

Ces équations démontrent que, peu importe le mode d'injection utilisé (pulse ou échelon), il est possible d'obtenir la RTD. Rappelons que ces relations sont valides seulement pour un système aux conditions limites fermées. La Figure 4.6 présente bien les corrélations existant entre les courbes  $E(t)$  et  $F(t)$ .



**Figure 4.6 – Relation entre la courbe  $E(t)$  et  $F(t)$**

Le choix du mode d'injection a peu d'incidence sur les résultats obtenus. De façon générale, la réalisation d'un essai de traçage sous forme d'échelon est plus facile à effectuer expérimentalement qu'une injection sous forme de pulse. En effet, il n'est pas nécessaire de connaître précisément la quantité de traceur injecté comparativement à une injection sous forme de pulse. Néanmoins, il est souvent difficile de maintenir la concentration de traceur constante à l'alimentation lors d'une injection échelon. De plus, obtenir la fonction  $E(t)$  d'une injection échelon implique une manipulation de la courbe  $F(t)$  sous forme différentielle, ce qui peut introduire des erreurs de calcul. Par ailleurs, la quantité de traceur nécessaire à la réalisation des essais échelons est plus importante. Si le traceur utilisé est onéreux ou dangereux, il semble plus utile d'utiliser un essai de traçage sous forme de pulse.

#### ***4.3.2 Temps de résidence moyen***

Le temps de résidence est un paramètre fréquemment utilisé dans l'analyse de la RTD. Le temps de résidence  $\tau$  représente le temps nécessaire pour faire passer un volume de décanteur et il est considéré égal au quotient du volume du décanteur par le débit de sousverse ( $V/Q$ ). Le temps de résidence moyen,  $t_m$ , représente le temps moyen que les particules passent à l'intérieur du décanteur. Ainsi, pour un décanteur idéal, lorsqu'il n'y a aucune dispersion et pour un débit constant, le temps de résidence égale le temps de résidence moyen :



$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t E(t) dt}{Q} = \frac{V}{Q} = \tau \quad (\text{Équation 4.12})$$

L'équation précédente représente la formule utilisée pour le calcul du temps de résidence moyen à partir de la courbe  $E(t)$  de la RTD. Il est cependant possible de calculer  $\tau$  directement des courbes  $C(t)$  et  $C(t)_{\text{échelon}}$ . Ainsi pour une injection pulse :

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \approx \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} = \frac{V}{Q} \quad (\text{Équation 4.13})$$

Pour une courbe  $C(t)_{\text{échelon}}$  :

$$\tau = \frac{\int_0^{C_{\max}} t dC_{\text{échelon}}}{\int_0^{C_{\max}} dC_{\text{échelon}}} = \frac{1}{C_{\max}} \int_0^{C_{\max}} t dC_{\text{échelon}} \quad (\text{Équation 4.14})$$

### 4.3.3 Variance

Dans l'analyse de la RTD, il est usuel de comparer les moments des courbes plutôt que de comparer les distributions entières. Le premier moment est le temps de résidence moyen précédemment décrit. Le second moment est la variance (Équation 4.15). La valeur de ce moment est un indice de l'étalement de la distribution. Ainsi, plus la variance est élevée, plus l'étalement est important.

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \tau)^2 E(t) dt \quad (\text{Équation 4.15})$$

#### 4.3.4 Fonction RTD normalisée, $E(\theta)$

Dans l'analyse des courbes de RTD, il est très fréquent de retrouver la fonction  $E(\theta)$  normalisée. Cette fonction est surtout utilisée avec des modèles d'écoulement plus complexes, car elle facilite la comparaison des courbes de RTD. En effet, la RTD normalisée permet de comparer directement des écoulements provenant de décanteurs de différentes tailles. Le paramètre  $\theta$  représente le nombre de fois que le volume total du réacteur s'est écoulé depuis le début de l'essai de traçage et il se calcule comme suit :

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad (\text{Équation 4.16})$$

Ainsi, la forme normalisée de la RTD s'exprime en fonction du temps de résidence moyen et elle se définit comme suit :

$$E(\theta) = \tau E(t) \quad (\text{Équation 4.17})$$

La Figure 4.7 présente la transformation d'une courbe  $E(t)$  en courbe  $E(\theta)$ . Mentionnons que dans les deux cas, l'aire sous la courbe reste égale à 1.

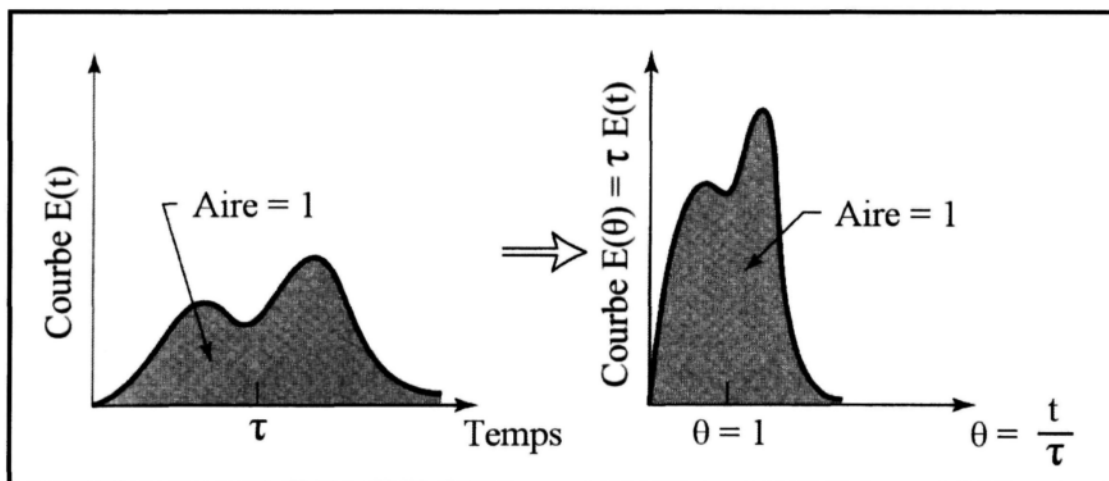


Figure 4.7 – Transformation de la courbe  $E(t)$  en courbe  $E(\theta)$  normalisée

#### 4.3.5 *Intégrale de convolution*

Il a été démontré qu'il est possible d'obtenir la RTD à l'aide d'essais de traçage expérimentaux spécifiques et de bilan de masse. De façon plus générale, il est possible d'établir une relation dans le temps entre l'injection d'un traceur et la concentration de celui-ci à la sousverse. En effet, il est possible de démontrer que la concentration du traceur à la sousverse d'un réacteur est reliée à la concentration ajoutée à l'entrée à l'aide de l'intégrale de convolution. Cette dernière est une technique mathématique qui permet de trouver le signal de sortie  $C_{out}(t)$  d'un système à l'aide d'un signal d'entrée. Autrement dit, la convolution permet par exemple de trouver la courbe  $C(t)$  d'un réacteur donné en déformant un signal d'entrée  $C_{in}(t)$  (injection de traceur) avec la RTD. Sa forme mathématique se définit comme suit :

$$C_{out}(t) = \int_0^t C_{in}(t-t') E(t') dt' \quad \text{(Équation 4.18)}$$

Bien évidemment, si  $C_{in}(t)$  et  $C_{out}(t)$  sont connus, alors il est possible de retrouver la fonction  $E(t)$  d'un réacteur donné grâce à l'intégrale de convolution. La Figure 4.8 présente un exemple d'application de l'intégrale de convolution. En somme, l'utilisation de l'intégrale de convolution peut aider à déterminer l'aspect de la courbe  $E(t)$  de la RTD mais elle nécessite la prise de données supplémentaires (mesure de la trace d'entrée du traceur) et demande des traitements mathématiques plus importants.

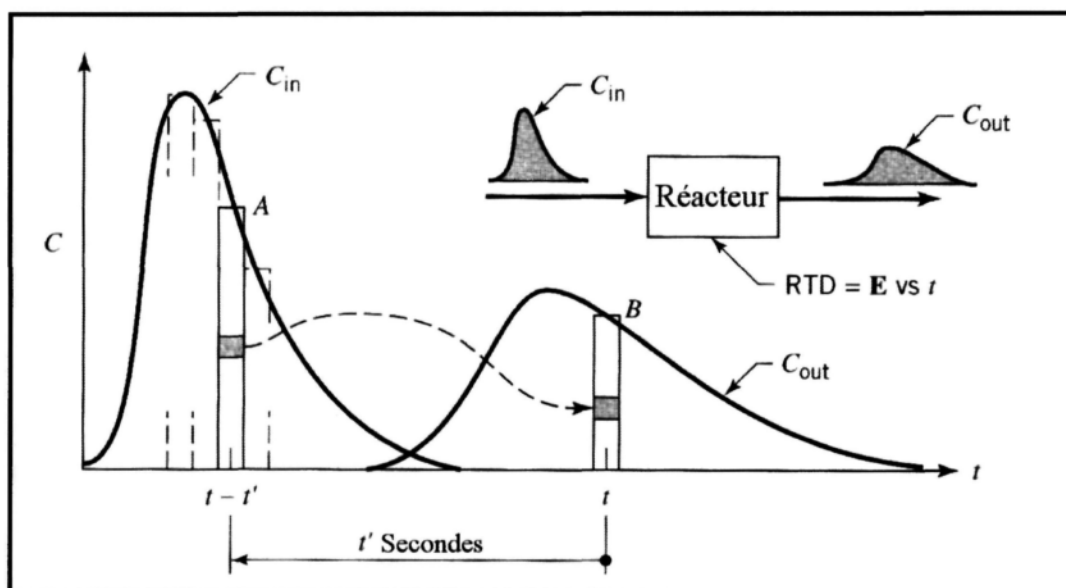


Figure 4.8 – Exemple d'intégrale de convolution

#### 4.4 RTD des réacteurs idéaux

L'analyse de la RTD s'effectue plus facilement dans les cas idéaux. Il existe deux types de réacteurs idéaux : le réacteur à écoulement piston (PFR) et le réacteur continu parfaitement agité (CSTR).

##### 4.4.1 Réacteur continu parfaitement agité (CSTR)

Dans un CSTR idéal, la concentration d'une substance donnée est la même partout à l'intérieur du réacteur et à sa sortie. Conséquemment, en effectuant un bilan de masse dans le réacteur, il est possible d'obtenir la RTD. Considérons le bilan de masse d'un traceur inerte, injecté au temps  $t = 0$  sous forme de pulse dans un CSTR idéal.

$$\text{Entrée} - \text{Sortie} + \text{production} = \text{Accumulation} \quad (\text{Équation 4.19})$$

Bien évidemment, il est possible d'éliminer le terme de production puisqu'il n'y a aucune réaction entre le traceur utilisé et le milieu ambiant (traceur conservatif, inerte). Ainsi, pour un temps  $t > 0$ , il n'y aura plus de traceur ajouté (pulse = instant très court) et l'équation précédente peut se résumer comme suit :

$$0 - Q_{out} C + 0 = V \frac{dC}{dt} \quad \text{(Équation 4.20)}$$

où  $Q_{out}$  est le débit de sousverse considéré constant dans le temps,  $t$  le temps,  $V$  le volume du réacteur et  $C$  représente à la fois la concentration du traceur à la sousverse et dans le réacteur. En réorganisant l'Équation 4.20 et en intégrant pour une concentration initiale de traceur  $C = C_0$  à  $t = 0$ , on obtient :

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{(Équation 4.21)}$$

L'Équation 4.21 indique la concentration du traceur à la sousverse d'un réacteur CSTR en tout temps. Pour retrouver l'équation de la courbe  $E(t)$ , il suffit d'utiliser l'Équation 4.6 ainsi :

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} = \frac{C_0 e^{-t/\tau}}{\int_0^{\infty} C_0 e^{-t/\tau} dt} = \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \quad \text{(Équation 4.22)}$$

De façon analogue, la courbe  $E(\theta)$  normalisée est retrouvée en utilisant les Équations 4.16 et 4.17 ;

$$E(\theta) = e^{-\theta} \quad \text{(Équation 4.23)}$$

La Figure 4.9 présente les courbes  $E(t)$  et  $E(\theta)$  obtenue pour un réacteur continu parfaitement agité. Rappelons que le temps de résidence du CSTR en conditions idéales est

égal à  $\tau$ . Il est possible de vérifier ce principe en utilisant l'Équation 4.21 dans l'Équation 4.12. De plus, la variance du CSTR peut également être calculée à l'aide de l'Équation 4.15 et est égale à  $\tau^2$ .

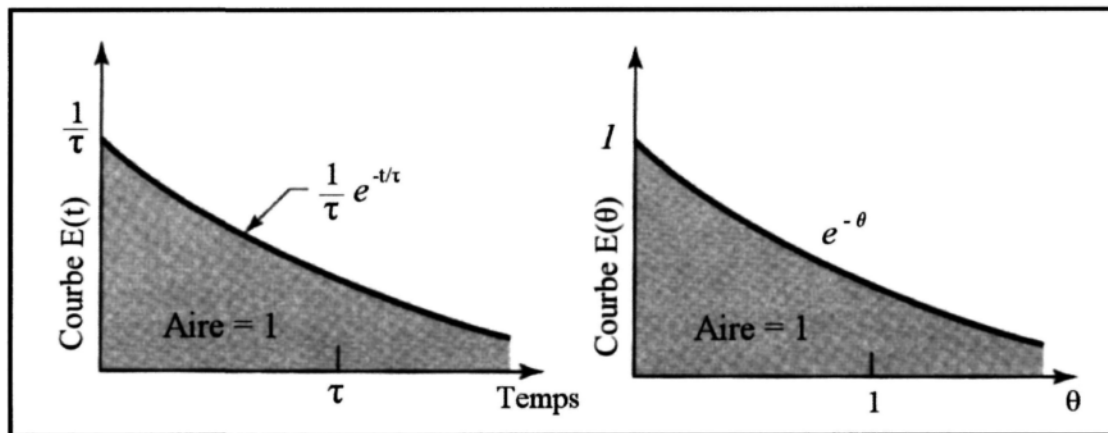


Figure 4.9 – Courbes  $E(t)$  et  $E(\theta)$  pour un CSTR

#### 4.4.2 Réacteur à écoulement piston (PFR)

Dans un PFR idéal, chacune des particules séjournent exactement le même temps à l'intérieur du réacteur. Une telle distribution est représentée par un pic de hauteur infini et d'épaisseur nulle ( $\sigma^2 = 0$ ) et dont l'aire sous la courbe est égale à 1 (le pic apparaît à  $t = \tau$  ou à  $\theta = 1$ ). Mathématiquement, la fonction delta Dirac est utilisée pour présenter un PFR (Figure 4.10):

$$E(t) = \delta(t - \tau) \quad (\text{Équation 4.24})$$

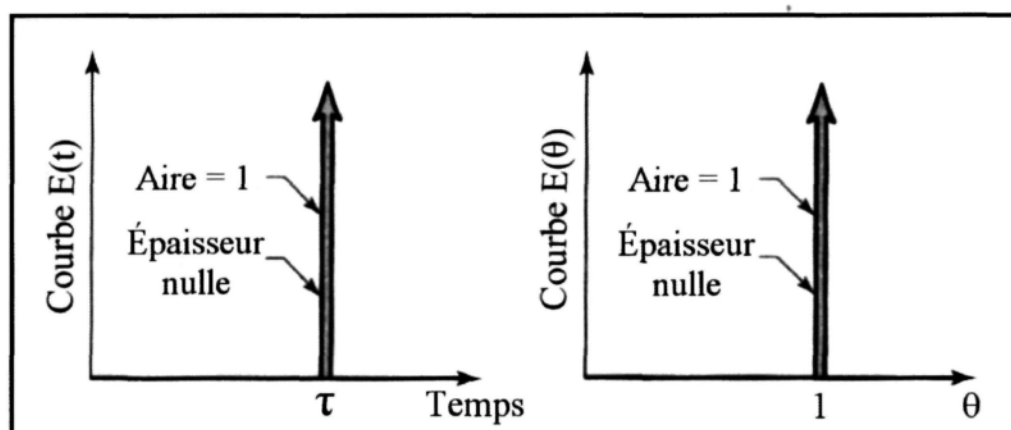


Figure 4.10 – Courbes  $E(t)$  et  $E(\theta)$  pour un PFR

## 4.5 Diagnostic et problèmes opérationnels

En plus de caractériser les écoulements dans un réacteur, la RTD peut également être utilisée pour diagnostiquer des problèmes à l'intérieur de celui-ci. En effet, l'utilisation d'un modèle préétabli permet d'expliquer certaines problématiques existant à l'intérieur du réacteur. Ainsi, les problèmes de court-circuit, de zone morte et de recirculation peuvent facilement être identifiés sur la RTD à l'aide du modèle compartimenté. La présente section porte donc sur le modèle compartimenté et sur la façon de l'utiliser.

### 4.5.1 Modèle compartimenté

Beaucoup de RTD se présentent sous la forme de courbes en cloche plus ou moins étalées. Il est possible de les ajuster à des fonctions mathématiques connues, du type somme d'exponentielles par exemple. Toutefois, cet ajustement purement mathématique n'apporte pas d'informations sur le comportement physique du réacteur. Afin d'obtenir un

modèle réaliste, il faut s'appuyer sur quelques idées simples suggérées par la physique d'une part et sur la construction du réacteur d'autre part. L'écoulement global est souvent le résultat de la juxtaposition de diverses zones où règnent des conditions d'écoulement particulières. Dans le modèle compartimenté, le réacteur et l'écoulement à travers celui-ci sont compartimentés de la façon suivante :

$$\text{Volume Total} \left\{ \begin{array}{ll} V_{PFR} & \rightarrow \text{(Région où il y a un écoulement piston)} \\ V_{CSTR} & \rightarrow \text{(Région où l'écoulement est parfaitement agité)} \\ V_{mort} & \rightarrow \text{(Zone stagnante ou morte dans le réacteur)} \end{array} \right.$$

$$\text{Débit Total} \left\{ \begin{array}{ll} Q_{actif} & \rightarrow \text{(Écoulement actif)} \\ Q_{court-circuit} & \rightarrow \text{(Court-circuit dans l'écoulement)} \\ Q_{recirculation} & \rightarrow \text{(Recirculation de l'écoulement)} \end{array} \right.$$

En associant ces paramètres selon différentes configurations, il est possible de développer des courbes de RTD d'allures spécifiques. Ainsi, en comparant les RTD expérimentales aux courbes théoriques du modèle compartimenté, il est possible de diagnostiquer certains problèmes opérationnels du réacteur.

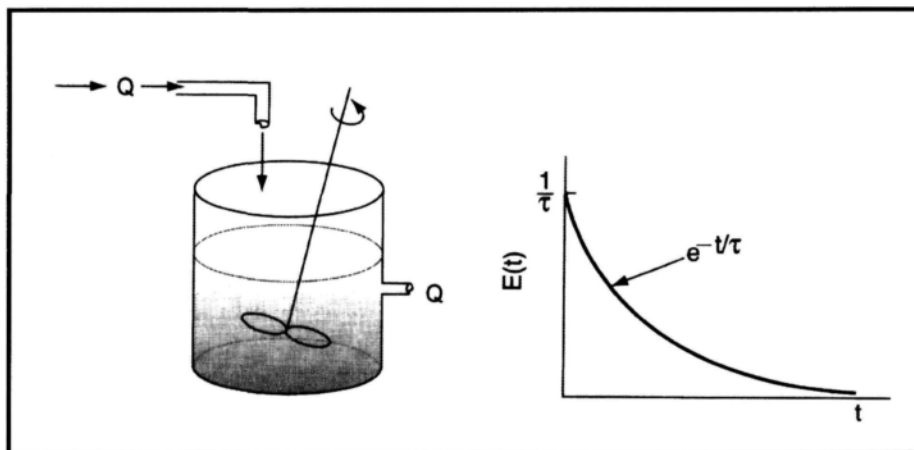
#### 4.5.1.1 CSTR

##### 4.5.1.1.1 Conditions d'opération idéales

La RTD d'un CSTR idéal a été établi à la section 4.4.1 (Figure 4.11). Mentionnons également que le temps de résidence moyen  $\tau$  d'un CSTR en conditions idéales est égal à



$V/Q$ . Ainsi, si  $\tau$  est grand, la courbe  $E(t)$  de la RTD diminue lentement. À l'inverse, si  $\tau$  est petit, la diminution est rapide.



**Figure 4.11 – Conditions d'opération idéales d'un CSTR**

#### 4.5.1.1.2 Cheminement préférentiel ou court-circuit

Dans le cas d'un court-circuit, il y a une partie de l'écoulement  $Q_{court-circuit}$  qui n'entre pas dans le réacteur. Ainsi, la portion de l'écoulement qui entre dans le réacteur est plus petite puisque  $Q_{total} = Q_{actif} + Q_{court-circuit}$ . Ainsi, le débit actif du réacteur est plus petit que le débit total et par conséquent,  $\tau_{actif} > \tau$ . Puisque  $\tau_{actif}$  est plus grand, la courbe  $E(t)$  de la RTD diminue plus lentement que dans le cas idéal. La Figure 4.12 illustre bien ce type de comportement. L'équation de la courbe  $E(t)$  d'un tel système est obtenue en associant les portions d'écoulement de chacune des branches à leur RTD ainsi :

$$E(t) = \frac{Q_{court-circuit}}{Q_{total}} \delta(t - 0) + \frac{Q_{actif}^2}{V Q_{total}} e^{\frac{-t Q_{actif}}{V}} \quad \text{(Équation 4.25)}$$

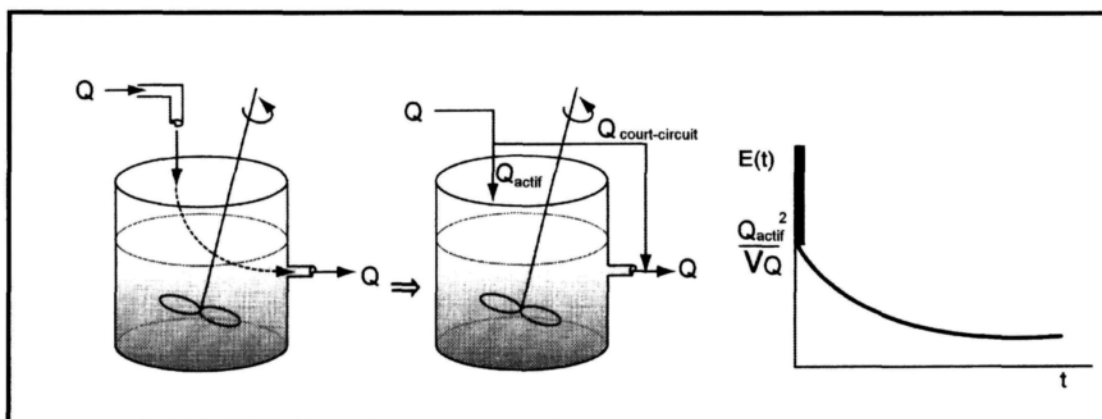


Figure 4.12 – CSTR idéal avec un court-circuit

#### 4.5.1.1.3 Volume mort

La présence de volume mort implique que le volume actif du réacteur est plus petit que le volume total ( $V_{\text{total}} = V_{\text{actif}} + V_{\text{mort}}$ ). Donc, la matière passe plus rapidement puisque le volume actif du réacteur est plus petit et  $\tau_{\text{actif}} < \tau$ . En somme, la courbe RTD diminue plus rapidement en présence de volume mort que dans le cas des conditions idéales. La Figure 4.13 présente la courbe  $E(t)$  d'un réacteur CSTR avec volume mort.

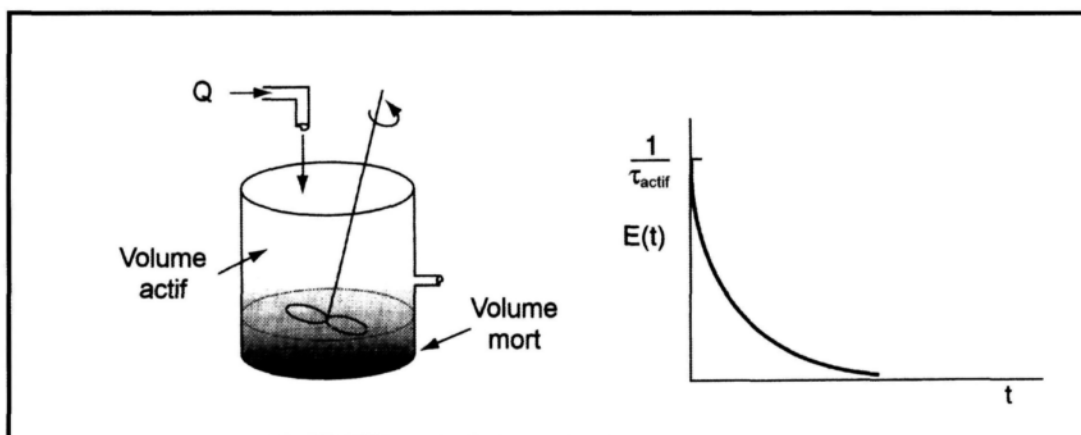
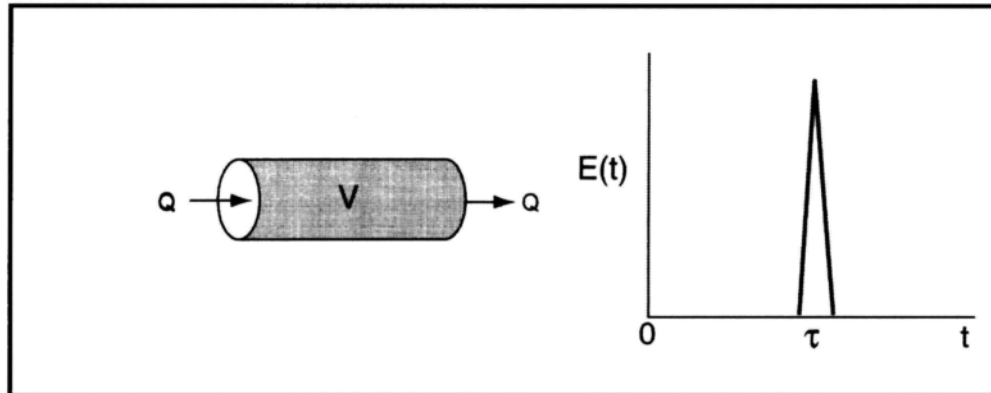


Figure 4.13 – CSTR idéal avec un volume mort

### 4.5.1.2 PFR

#### 4.5.1.2.1 Conditions d'opération idéales

Tel que décrit à la section 4.4.2, la RTD d'un PFR en conditions idéales est représentée par une fonction delta Dirac qui apparaît au temps de résidence  $\tau$  égal à  $V/Q$ .



**Figure 4.14 – Conditions d'opération idéales d'un PFR**

#### 4.5.1.2.2 Cheminement préférentiel ou court-circuit

Les cheminements préférentiels apparaissent surtout lorsqu'il y a présence d'un lit filtrant et/ou de deux composants de nature différente (liquide/solide) dans le réacteur. Ils agissent sur l'écoulement de façon similaire à un court-circuit. Ainsi, puisque  $Q_{\text{actif}} < Q_{\text{total}}$ , le temps de résidence moyen  $\tau$  est plus grand que celui obtenu pour des conditions idéales ( $\tau_{\text{actif}} > \tau$ ). La figure suivante représente bien cette situation. En effet, le premier pic est associé à la portion du court-circuit et le second à celle du réacteur.

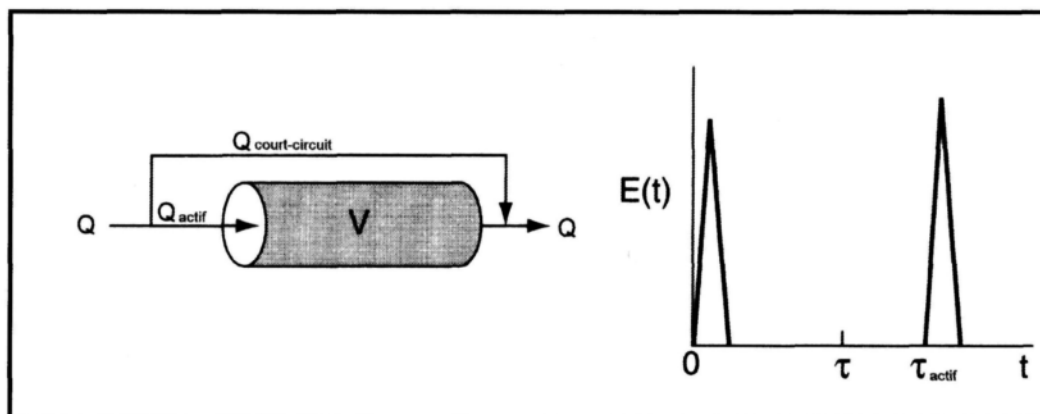


Figure 4.15 – PFR idéal avec un court-circuit

#### 4.5.1.2.3 Volume mort

Les volumes morts dans les PFR se manifestent sous forme de recirculation interne à l'entrée du réacteur. Ainsi, le volume actif du réacteur est plus petit que le volume total et par conséquent  $\tau_{\text{actif}} = V_{\text{actif}} / Q$ , donc le temps de résidence moyen de ce type de réacteur est plus petit que dans le cas des conditions idéales.

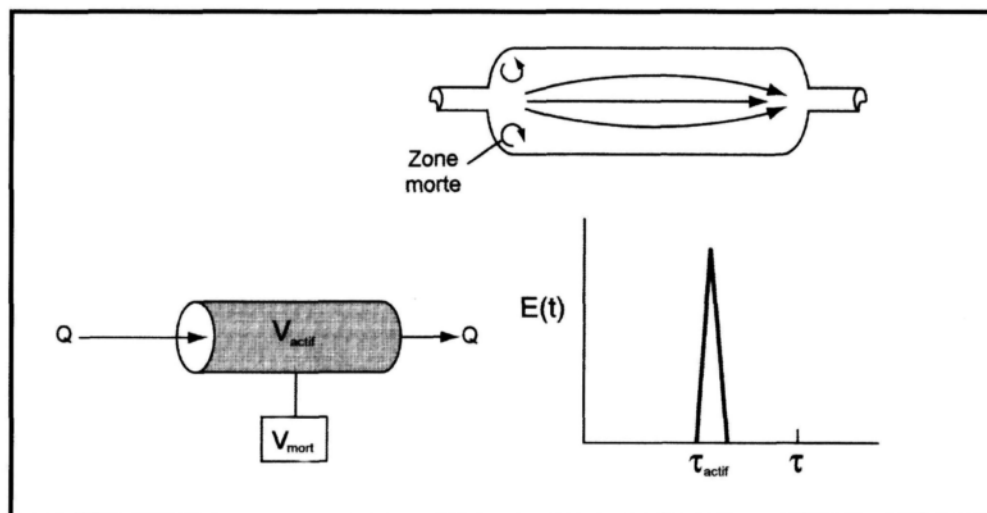
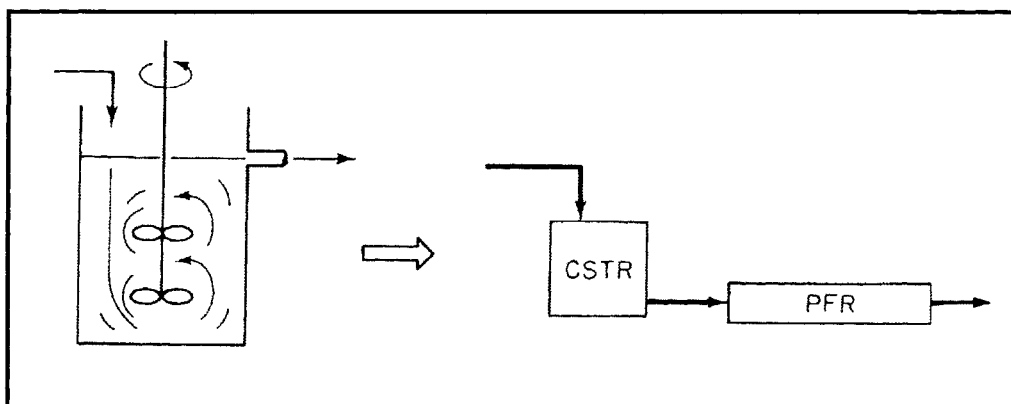


Figure 4.16 – PFR idéal avec une zone morte

### 4.5.1.3 PFR et CSTR en série

Dans un réacteur, l'intensité des zones d'agitation peut varier en fonction de l'emplacement. Ainsi, si un agitateur est utilisé, les zones à proximité de celui-ci sont parfaitement agitées et comparables à un réacteur CSTR. Mais avant d'atteindre ou après avoir quitté cette zone parfaitement agitée, les substances du mélange peuvent circuler dans le réacteur en suivant un chemin plus ou moins tortueux. Ce dernier peut être représenté sous forme d'écoulement PFR de longueur variable. Donc, une combinaison de CSTR et de PFR en série est utilisée pour représenter ce type de réacteur agité. Mentionnons également que l'emplacement des points d'alimentation et de sousverse du réacteur influence l'aspect des zones d'agitation.

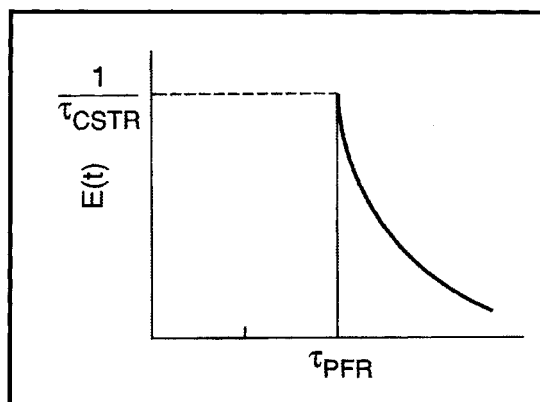


**Figure 4.17 – Réacteur modélisé à l'aide d'un CSTR en série avec un PFR**

Considérons un réacteur CSTR suivi par un réacteur PFR tel que présenté à la Figure 4.17. Le temps de résidence du réacteur CSTR est noté  $\tau_{CSTR}$  et celui du PFR  $\tau_{PFR}$ . Si un pulse de traceur est introduit dans l'alimentation du CSTR, la concentration à la sortie de celui-ci est exprimé en fonction du temps selon l'Équation 4.21. Ensuite, cette courbe est

déplacée dans le temps selon un temps  $t = \tau_{PFR}$  à la sortie du réacteur PFR. La RTD d'un tel système s'exprime selon l'Équation 4.26. La Figure 4.18 présente un exemple de ce type de courbe.

$$E(t) = \begin{cases} 0 & t \leq \tau_{PFR} \\ e^{\frac{-(t-\tau_{PFR})}{\tau_{CSTR}}} & t \geq \tau_{PFR} \end{cases} \quad \text{(Équation 4.26)}$$



**Figure 4.18 – Courbe  $E(t)$  pour un CSTR et un PFR en série**

Pour une situation inverse, c'est-à-dire un PFR suivi d'un CSTR, la même RTD est obtenue. En effet, l'ordre d'emplacement des réacteurs n'a pas d'incidence sur la courbe de RTD lorsque le système est en série.

#### **4.5.1.4 Recirculation dans un réacteur**

Considérons un réacteur à l'intérieur duquel il y a une boucle de recirculation. Lorsque le traceur est injecté, celui-ci traverse le réacteur et une portion du traceur est recyclée ou retournée à l'intérieur du réacteur. Conséquemment, la quantité de traceur

évacuée à la sortie du réacteur représente seulement une portion de la quantité initialement injectée. Ce phénomène se poursuit ainsi jusqu'à ce que la quantité totale de traceur soit évacuée. La courbe  $C(t)$  et la RTD de ce type de réacteur à une signature particulière et facilement identifiable. En effet, les traces obtenues présentent plusieurs pics d'amplitude décroissante. Le premier pic représente la quantité de traceur initialement évacuée et chacun des autres, la portion de traceur recyclée. Une schématisation des traces de  $C(t)$  obtenues pour une recirculation est présentée dans les Figures 4.19 pour un réacteur CSTR et 4.20 pour un réacteur PFR.

#### **4.5.1.5**      *Exemple de diagnostic*

L'utilisation du modèle compartimenté et du modèle de PFR et CSTR en série permet de diagnostiquer des problèmes opérationnels dans un réacteur. Concrètement, il est possible d'appliquer les notions de ces modèles directement à des courbes  $C(t)$  ou RTD pour obtenir des informations pertinentes sur les écoulements. Les deux figures suivantes illustrent comment utiliser le modèle compartimenté pour analyser des RTD expérimentales.

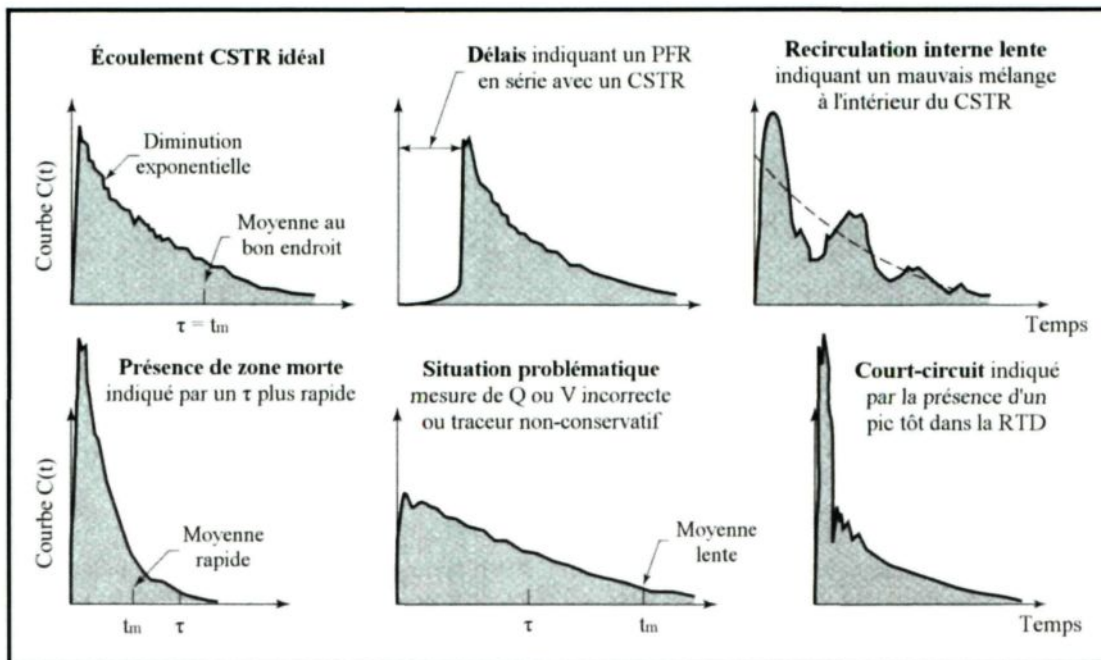


Figure 4.19 – Problématique rencontrée dans un réacteur CSTR

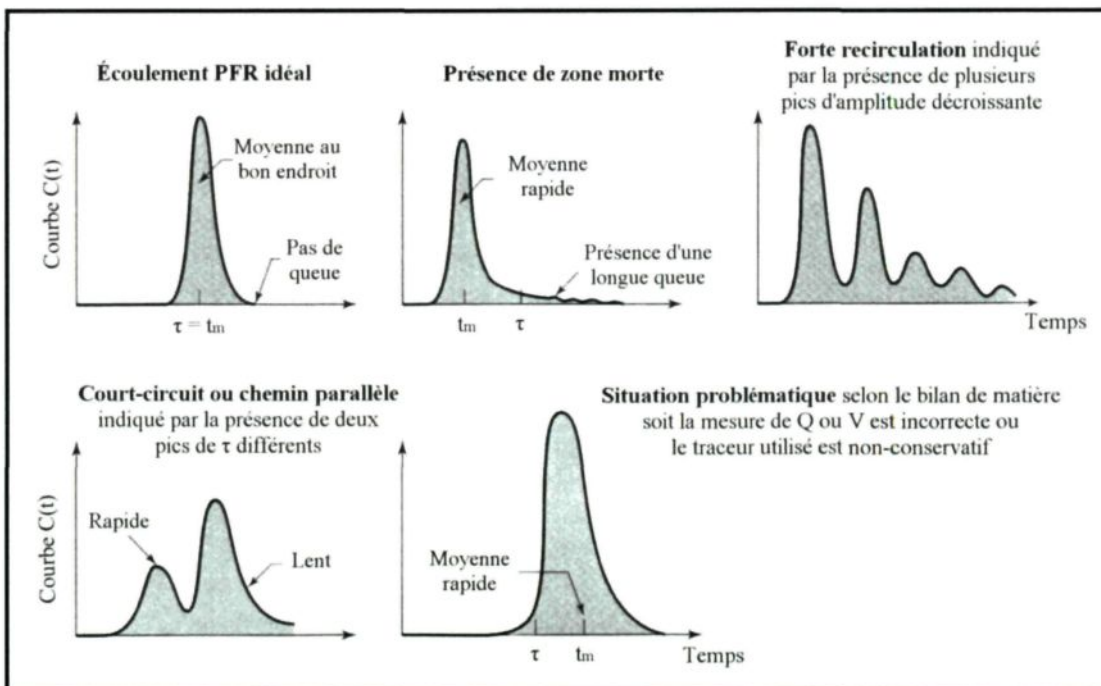


Figure 4.20 – Problématique rencontrée dans un réacteur PFR



## 4.6 Réacteurs non-idéals

Il existe différents modèles pour analyser les comportements non-idéaux des réacteurs variant selon le type d'écoulement retrouvé à l'intérieur de celui-ci (écoulement PFR, CSTR ou quelque part entre les deux). Pour des écoulements déviant légèrement du PFR, comme c'est probablement le cas pour le décanteur de boues rouges, il existe deux modèles : le modèle des réservoirs en série et le modèle de dispersion. Selon Levenspiel<sup>(24)</sup>, ces modèles sont équivalents et fournissent essentiellement les mêmes résultats. Le modèle du réservoir en série a cependant l'avantage d'être plus simple à utiliser et peut facilement être adapté pour traiter certains aspects physiques comme dans le modèle compartimenté.

### 4.6.1 *Modèle des réservoirs en série*

Le modèle des réservoirs en série permet de représenter un réacteur donné par un ensemble de petits réacteurs parfaitement agités (CSTR). Ainsi, en analysant la RTD, il est possible de déterminer le paramètre  $N$  du modèle, soit le nombre de CSTR en série qui fournira une courbe de RTD similaire à celle obtenue expérimentalement. La valeur  $N$  peut être calculée à partir de la variance de la RTD :

$$N = \frac{\tau^2}{\sigma^2} \quad \text{(Équation 4.27)}$$

Mentionnons cependant que si la RTD possède une longue trainée, le calcul de  $N$  devient plus difficile et par conséquent, il faut parfois ajuster manuellement sa valeur. Par ailleurs, la courbe  $E(t)$  peut être obtenue selon l'équation suivante :

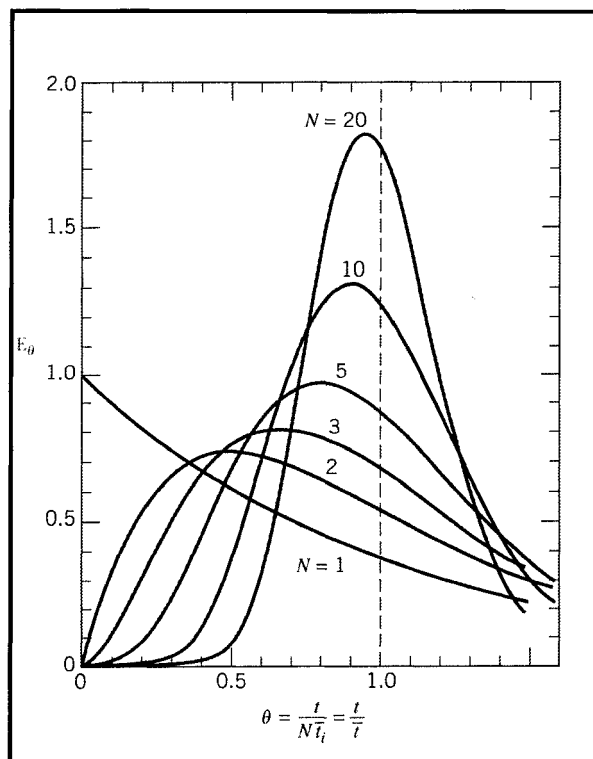
$$E(t) = \left(\frac{t}{\tau}\right)^{N-1} \frac{N^N}{\tau(N-1)!} e^{-tN/\tau} \quad (\text{Équation 4.28})$$

Cette équation peut également être normalisée :

$$E(\theta) = \tau E(t) = N \frac{(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} \quad (\text{Équation 4.29})$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \quad (\text{Équation 4.30})$$

La Figure 4.21 illustre le type de graphiques obtenus par les équations précédentes pour plusieurs valeurs de N. En effet, pour 1 CSTR (N = 1), la courbe correspond au CSTR idéal (Figure 4.9). Cependant, plus le nombre de CSTR est grand, plus la courbe RTD (E(t) ou E(θ)) tend vers un écoulement PFR dans des conditions idéales.



**Figure 4.21 – Courbes RTD pour le modèle des réservoirs en série**

D'autre part, il est possible de trouver les propriétés de la courbe RTD directement sur le graphique en utilisant les points d'inflexion ( $E_{\text{inf}}$  et  $E_{\theta, \text{inf}}$ ) de la courbe ou son maximum. Ainsi, la Figure 4.22 présente les caractéristiques des courbes RTD du modèle des réservoirs en série.

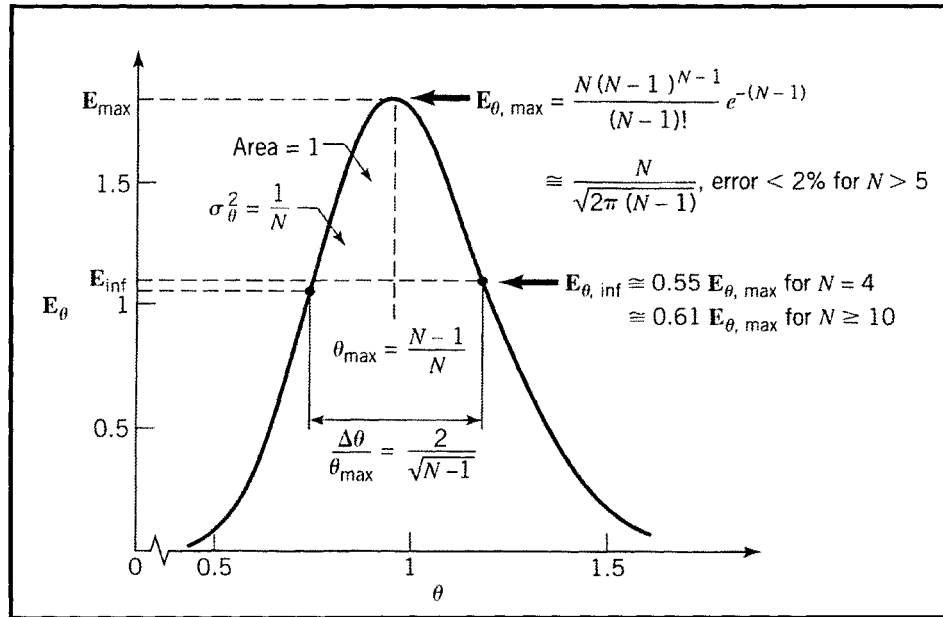


Figure 4.22 – Caractéristiques de la courbe  $E(\theta)$  du modèle des réservoirs en série

#### 4.6.2 Modèle de dispersion

Le modèle de dispersion suppose qu'un pulse de traceur idéal est introduit dans un réacteur PFR et que celui-ci est dispersé axialement à mesure qu'il traverse le réacteur. Cette dispersion se traduit par un étalement de la courbe de RTD. Une analogie avec la loi de Fick est utilisée pour quantifier la dispersion, où le coefficient de dispersion  $D$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) représente l'étalement de la courbe. Cette dernière est également caractérisée par le terme  $D/uL$  ou  $(1/Pe)$ , où  $L$  représente la longueur du réacteur (m) et  $u$  la vitesse de l'écoulement

(m/s). Lorsque  $D/uL$  tend vers 0, il y a peu ou pas de dispersion (écoulement PFR idéal). À l'inverse, lorsque  $D/uL$  tend vers  $\infty$ , il y a beaucoup de dispersion (écoulement CSTR).

Le terme  $D/uL$  est évalué selon la courbe de RTD du réacteur étudié. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la valeur de  $D/uL$  d'une courbe expérimentale : en calculant la variance, en mesurant la hauteur maximale et/ou de l'épaisseur au point d'inflexion, en effectuant des analyses statistiques, des ajustements de courbes, etc. La méthode la plus couramment utilisée a été développée par Levenspiel<sup>(24)(67)(68)(69)(70)</sup> et est illustrée à la figure suivante :

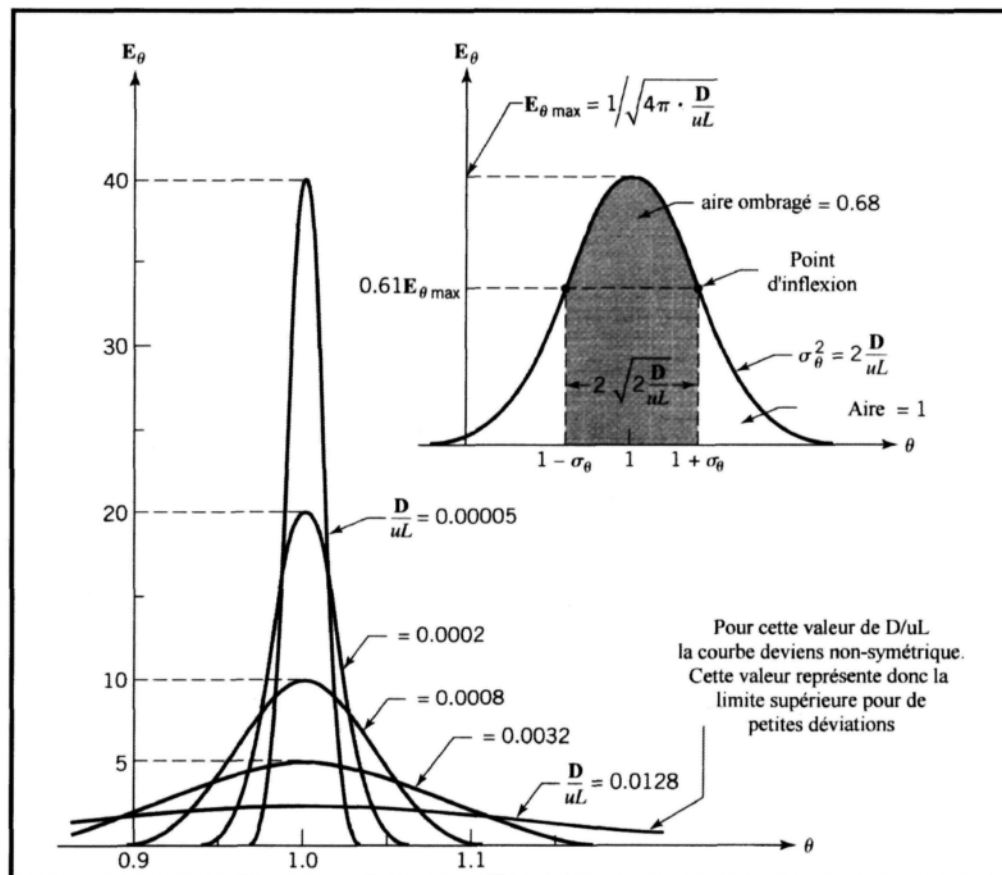


Figure 4.23 – Relation entre le terme  $D/uL$  et la courbe  $E(\theta)$

Ainsi, il est possible de développer des équations pour des petites dispersions et de les représenter sous forme de courbe gaussienne :

$$E(t) = \sqrt{\frac{u^3}{4\pi D L}} \exp\left[-\frac{(L - ut)^2}{4 D L / u}\right] \quad (\text{Équation 4.31})$$

L'équation de la RTD normalisée est également utilisée car elle permet de simplifier l'analyse de  $D/uL$ . Ainsi pour  $\theta = t/\tau$  l'Équation 4.31 devient :

$$E(\theta) = \frac{1}{\sqrt{4\pi (D/uL)}} \exp\left[-\frac{(1 - \theta)^2}{4(D/uL)}\right] \quad (\text{Équation 4.32})$$

Par conséquent, dépendamment de l'équation utilisée la variance se définit comme :

$$\sigma^2 = 2\left(\frac{DL}{u^3}\right) \quad \text{et} \quad \sigma_\theta^2 = 2\left(\frac{D}{uL}\right) \quad (\text{Équation 4.33})$$

Les équations précédemment établies pour l'évaluation de  $D/uL$  et pour l'analyse de la RTD dans le modèle de dispersion sont valides seulement pour des petites dispersions. En effet, il est possible d'observer sur la Figure 4.23 que plus la valeur de  $D/uL$  est grande, moins les courbes générées sont symétriques. Conséquemment, le modèle de dispersion doit être adapté pour des dispersions plus importantes. Cependant, il n'existe aucune expression analytique pour représenter les courbes RTD dans ces conditions. Les courbes doivent par conséquent être calculées par des méthodes numériques<sup>(4)</sup>. La Figure 4.24 représente le type de courbes obtenues dans cette situation. Mentionnons cependant qu'il est possible d'évaluer la variance de ce type de courbe (donc  $D/uL$ ) selon l'équation suivante :

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{\tau^2} = 2\left(\frac{D}{uL}\right) - 2\left(\frac{D}{uL}\right)\left[1 - e^{-uL/D}\right] \quad (\text{Équation 4.34})$$

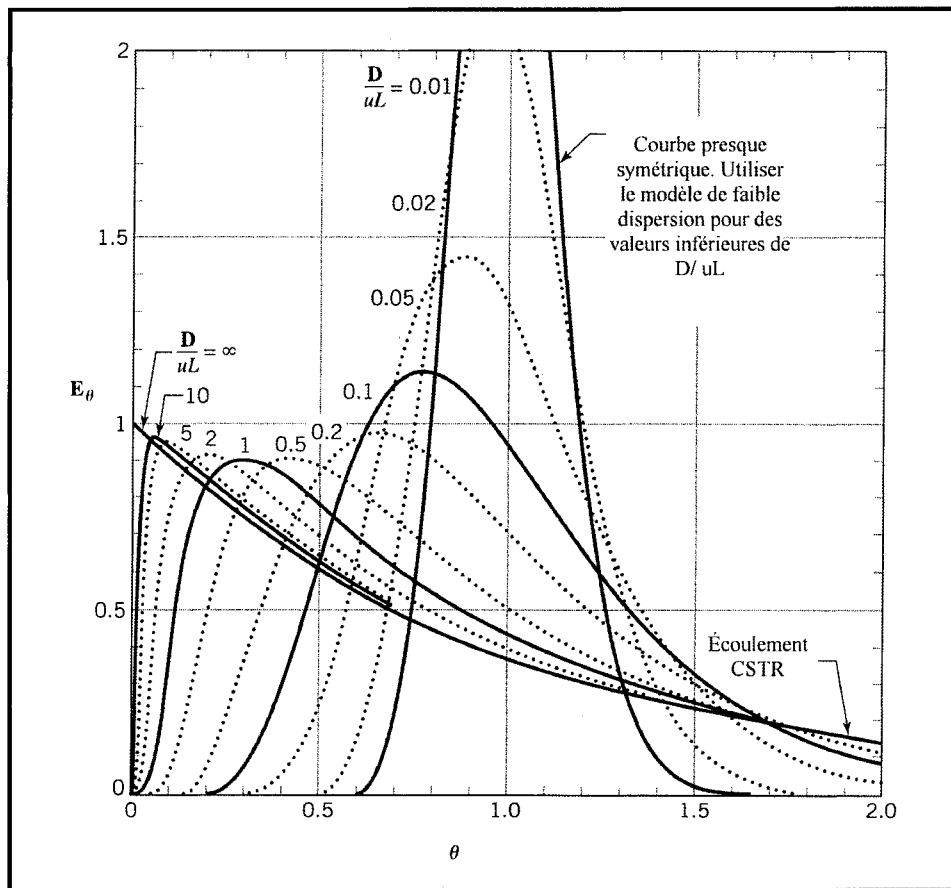


Figure 4.24 – Courbes  $E(\theta)$  obtenues pour des dispersions importantes

#### 4.7 RTD des procédés à débit et volume variables

La plupart des essais de traçage sont réalisés lorsque le système à l'étude est à l'équilibre (c'est-à-dire que les conditions d'entrées et de sorties sont constantes dans le temps). Ainsi, pour de telles conditions, les descriptions mathématiques précédemment établies s'appliquent pour calculer la distribution du temps de résidence « RTD ». Si l'écoulement dans le système à l'étude où tous autres paramètres varient durant l'essai de traçage, alors le traitement mathématique doit être modifié<sup>(72)(73)(74)</sup>. Il existe très peu de

littératures traitant de ce sujet et encore moins de solutions pratiques à utiliser<sup>(72)(73)(74)(75)(76)(77)(78)(79)(80)(81)(82)</sup>. Néanmoins, Niemi<sup>(72)(75)(76)(77)(78)</sup> et Fernandez-Sempere et al.<sup>(79)(80)</sup> ont développé des systèmes d'équations pour tenir compte des éventuelles variations de débit et/ou de volume. Les deux groupes de chercheurs utilisent des systèmes d'équations différents mais qui sont similaires. Cette section décrit brièvement comment adapter les calculs de RTD pour tenir compte de ces variations.

Lors de la réalisation d'un essai de traçage dans un système à deux phases, comme les décanteurs de boues rouges, il est très difficile d'obtenir un parfait état d'équilibre. En effet, dans un procédé industriel, l'écoulement du matériel varie souvent voire constamment pour de multiples raisons. Si un essai de traçage est effectué dans ces conditions, l'analyse mathématique de la RTD doit donc être modifiée. Dans ce cas, plusieurs paramètres et variables doivent être mesurés durant un essai de traçage dont le débit de l'écoulement  $Q$  et le volume  $V$  du système à l'étude. Fort heureusement, les variations de débit et de volume sont des paramètres généralement mesurés par les opérateurs industriels. En effet, l'utilisation de débitmètres (mesure du débit) et/ou d'appareils permettant de mesurer le niveau de liquide/volume du système est très courant dans les procédés industriels. Conséquemment, les mesures de débit et de volume peuvent être utilisées pour adapter l'analyse mathématique de la RTD.

### 4.7.1 Système à volume constant et débit variable

#### 4.7.1.1 Injection sous forme de pulse

Considérons un système de volume  $V_0$  constant et de débit  $Q$  variable à l'intérieur duquel on effectue un essai de traçage sous forme de pulse. Ainsi, au cours de l'essai de traçage, le débit global du système varie mais le débit d'entrée et de sortie sont toujours égaux afin de maintenir le volume constant ( $Q_{in} = Q_{out}$ ). Afin de réduire la complexité ajoutée par le débit variable, la RTD peut être exprimée en fonction de la quantité de matériel (en termes d'unité de volume) ayant traversé le système à l'étude plutôt qu'en fonction du temps écoulé. En effet, on remarque que le volume évacué à la sortie du décanteur au temps  $t$  correspond à :

$$dV = Q(t) dt \quad (\text{Équation 4.35})$$

Par conséquent, le volume cumulatif total de matériel évacué à la sousverse à un temps  $t$  donné est considéré égal à :

$$V = \int_0^t Q(t) dt \quad (\text{Équation 4.36})$$

La quantité de traceur mesurée à la sortie du décanteur peut donc être exprimée en fonction du volume cumulatif traité par le décanteur «courbe  $C(V)$  » au lieu du temps « courbe  $C(t)$  ». En exprimant ainsi les Équations 4.1 et 4.2 deviennent :

$$\Delta M = C(V) \Delta V \quad (\text{Équation 4.37})$$

$$M_0 = \int_0^\infty C(V) dV \quad (\text{Équation 4.38})$$



L'aire sous la courbe  $C(V)$  est donc égale à  $M_0$  :

$$\text{Aire sous la courbe} = \int_0^{\infty} C(V) dV = M_0 \cong \sum_i C_i Q_i \Delta t_i \quad (\text{Équation 4.39})$$

Tel que mentionné précédemment, la courbe  $E(t)$  est une fonction de la RTD obtenue à l'aide de la courbe  $C(t)$  et exprimant la « probabilité d'évacuation du matériel par unité de temps » (Équations 4.4 et 4.5). De façon similaire, une fonction  $E(V)$  peut également être obtenue à l'aide de la courbe  $C(V)$  exprimant ainsi la « probabilité d'évacuation du matériel par unité de volume » :

$$\frac{\Delta M}{M_0} = \frac{C(V)}{M_0} \Delta V \quad (\text{Équation 4.40})$$

$$E(V) = \frac{C(V)}{M_0} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta M}{M_0} = E(V) \Delta V \quad (\text{Équation 4.41})$$

Ces deux équations représentent la fraction de matériel (traceur) quittant le décanteur au moment où un volume  $V$  a été traité par le décanteur pendant la sortie d'un élément de volume  $\Delta V$ . La courbe  $E(V)$  devient une fonction de la distribution du volume de résidence « RVD » et possède les mêmes propriétés que la courbe  $E(t)$  et la RTD :

$$E(V) = \frac{C(V)}{\int_0^{\infty} C(V) dV} \quad \text{et} \quad \int_0^{\infty} E(V) dV = 1 \quad (\text{Équation 4.42})$$

Mentionnons que l'équation précédente est valide seulement lorsque les variations de débit n'influencent pas le modèle de l'écoulement. Autrement dit, peu importe la variation de débit rencontrée, les chemins empruntés par la matière pour traverser le système sont les mêmes. Cette affirmation deviendrait invalide dans le cas, par exemple, où

les variations de débits entraînent un changement dans le régime d'écoulement (exemple : passer du régime laminaire à turbulent).

#### **4.7.1.2 Injection sous forme d'échelon**

La fonction cumulative  $F(t)$  de la RTD est obtenue lorsque l'injection de traceur s'effectue sous forme d'échelon. Pour le même type d'injection, la fonction cumulative  $F(V)$  de la RVD se définit comme étant :

$$F(V) = \left[ \frac{C(V)_{\text{échelon}}}{C_{\text{max}}} \right] = \int_0^V E(V') dV', \quad (\text{Équation 4.43})$$

L'aspect de la courbe  $C(V)_{\text{échelon}}$  et de  $F(V)$  est le même que celui présenté à la Figure 4.5 sauf que l'abscisse du temps est remplacé par une abscisse de volume.

#### **4.7.1.3 Relation entre les courbes $E(V)$ et $F(V)$**

Les mêmes relations sont observées entre  $E(V)$  et  $F(V)$  que celles entre  $E(t)$  et  $F(t)$  ; ainsi les Équations 4.10 et 4.11 deviennent :

$$F(V) = \int_0^V E(V) dV \quad \text{et} \quad \int_V^\infty E(V) dV = 1 - F(V) \quad (\text{Équation 4.44})$$

#### **4.7.1.4 Volume de résidence moyen**

Le volume de résidence moyen  $V_m$  représente la quantité de boue moyenne évacuée du décanteur pour que les particules traversent ce dernier jusqu'à la sousverse. Pour un

décanteur idéal, le volume de résidence moyen  $V_m$  devrait être égal au volume de boue dans le décanteur  $V_0$  :

$$V_m = \frac{\int_0^{\infty} V E(V) dV}{\int_0^{\infty} E(V) dV} = \int_0^{\infty} V E(V) dV = V_0 \quad (\text{Équation 4.45})$$

Il est également possible de calculer le volume de boue moyen directement des courbes  $C(V)$  et  $C(V)_{\text{échelon}}$  selon :

$$V_m = \frac{\int_0^{\infty} V C(V) dV}{\int_0^{\infty} C(V) dV} \cong \frac{\sum_i V_i C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_i C_i Q_i \Delta t_i} = V_0 \quad (\text{Équation 4.46})$$

$$V_m = \frac{\int_0^{C_{\max}} V dC_{\text{échelon}}}{\int_0^{C_{\max}} dC_{\text{échelon}}} = \frac{1}{C_{\max}} \int_0^{C_{\max}} V dC_{\text{échelon}} \quad (\text{Équation 4.47})$$

#### 4.7.1.5 Variance

L'étalement de la distribution est mesuré à l'aide de la variance (Équation 4.15) :

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - V_m)^2 E(V) dV \quad (\text{Équation 4.48})$$

#### 4.7.1.6 *Fonction RVD normalisée, $E(Z)$*

La fonction RVD peut également être normalisée afin de faciliter les comparaisons entre plusieurs courbes. La variable adimensionnelle  $Z$  représente le nombre de fois que le volume total du décanteur s'est écoulé depuis le début de l'essai de traçage. Elle est donc obtenue en divisant la quantité de matériel ayant traversé le système au temps  $t$  par le volume total :

$$Z(t) = \frac{V}{V_0} = \frac{1}{V_0} \int_0^t Q(t) dt \quad (\text{Équation 4.49})$$

Autrement dit, l'Équation 4.49 permet de représenter le temps écoulé depuis l'injection du traceur en termes de quantité de matériels évacués. La forme de la RVD normalisée s'exprime selon :

$$E(Z) = V_0 E(V) \quad (\text{Équation 4.50})$$

L'Équation 4.49 est comparable à l'Équation 4.16 à l'exception que  $\theta$  est remplacé par  $Z$  afin de limiter les confusions dans l'appellation des variables. Par ailleurs, si le débit reste constant durant un essai de traçage, l'Équation 4.49 démontre que  $Z = V / V_0 = t / \tau = \theta$ . Ceci indique que la RVD, dans ce cas particulier, est similaire à celle obtenue lors de la normalisation de la RTD en condition d'équilibre (Équations 4.16 et 4.17). De façon analogue, si  $\theta$  de l'Équation 4.17 est remplacé par  $Z$ , la RTD obtenue est modifiée pour tenir compte des variations de débit.

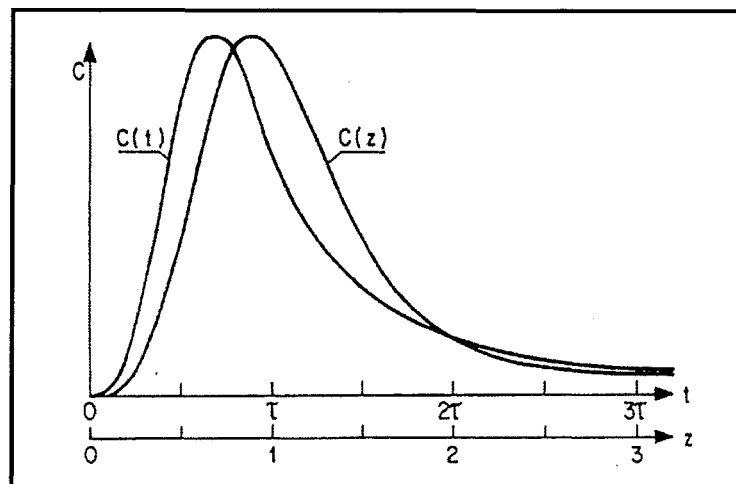
#### 4.7.1.6.1 *Z moyen*

La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est importante pour le développement des équations des modèles d'écoulement et pour l'analyse de la RVD. En utilisant les Équations 4.12, 4.17, 4.45, 4.49 et 4.50, la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est égal à :

$$Z_{\text{moyen}} = \int_0^{\infty} Z E(Z) dZ = \frac{1}{V_0} \int_0^{\infty} V E(V) dV = \frac{V_0}{V_0} \Rightarrow 1 \quad (\text{Équation 4.51})$$

#### 4.7.1.6.2 *Relation entre la courbe C(Z) et la courbe E(Z)*

Tel que spécifié précédemment, la courbe  $C(t)$  exprime la « probabilité d'évacuation du matériel par unité de temps » et la courbe  $C(V)$  exprime la « probabilité d'évacuation du matériel par unité de volume ». Afin de limiter les manipulations mathématiques des courbes, il est possible d'exprimer la variation de la concentration du traceur à la sousverse directement en fonction de la variable  $Z$ . Ainsi, la courbe  $C(Z)$  représente la probabilité d'évacuation du matériel en fonction de  $Z$ . Le fait de corriger la courbe  $C(t)$  pour tenir compte des variations de débit influence l'aspect de la trace obtenue. En effet, la trace peut s'étendre ou se contracter en différentes sections selon les débits mesurés. La Figure 4.25 présente un exemple de modification de la courbe  $C(t)$  en courbe  $C(Z)$ .



**Figure 4.25 – Courbe C(t) ou C(Z) pour un même essai de traçage**

La fonction RVD normalisée peut être exprimée en fonction de la variable  $Z$  ; ainsi, l'Équation 4.50 devient :

$$E(Z) = V_0 E(V) = V_0 \frac{C(V)}{M_0} \cong \frac{C(Z)}{\int_0^{\infty} C(Z) dZ} \cong V_0 \frac{E(t)}{Q(t)} \quad \text{(Équation 4.52)}$$

Les derniers termes de l'Équation 4.52 sont obtenus en combinant les Équations 4.5, 4.6 et 4.41. En considérant que le volume  $V_0$  est constant et que l'échelle de temps est reliée à la variable  $Z$ , il est possible d'exprimer la RVD normalisée «  $E(Z)$  » en fonction de la variation de débit et de la RTD «  $E(t)$  ».

#### 4.7.1.7 Intégrale de convolution

L'intégrale de convolution pour un débit variable devient (Équation 4.18) :

$$C_{out}(V) = \int_0^V C_{in}(V - V') E(V') dV' \quad \text{(Équation 4.53)}$$

#### 4.7.1.8 Réacteurs idéaux

##### 4.7.1.8.1 Réacteur continu parfaitement agité (CSTR)

Supposons un pulse de traceur injecté dans un CSTR de volume constant mais de débit variable. En utilisant le calcul du bilan de matière (section 4.4.1) et l'Équation 4.45 pour un système à débit variable, on retrouve que :

$$0 - Q_{out} C + 0 = V_0 \frac{dC}{dt} = V_0 \frac{dC}{dV} \frac{dV}{dt} = V_0 Q_{out} \frac{dC}{dV} \quad (\text{Équation 4.54})$$

$$C(V) = C_0 \exp \left[ -\frac{V}{V_0} \right] \quad (\text{Équation 4.55})$$

$$E(V) = \frac{1}{V_0} \exp \left[ -\frac{V}{V_0} \right] \quad (\text{Équation 4.56})$$

$$E(Z) = e^{-Z} \quad (\text{Équation 4.57})$$

##### 4.7.1.8.2 Réacteur à écoulement piston (PFR)

Considérons le cas d'un réacteur à écoulement piston à volume constant et à débit variable. La RVD obtenue est exactement la même que celle obtenue dans les conditions d'un système à l'équilibre, c'est-à-dire que la fonction mathématique delta Diract est utilisée pour représenter le modèle d'écoulement mais en utilisant le nouvel axe  $Z$ .

$$E(V) = \delta(V - V_0) \quad (\text{Équation 4.58})$$

$$E(Z) = \delta(Z - 1) \quad (\text{Équation 4.59})$$

#### 4.7.1.9 PFR et CSTR en série

Dans le cas d'un PFR et CSTR en série à débit variable, la RVD devient :

$$E(V) = \begin{cases} 0 & V \leq V_{PFR} \\ e^{\frac{-(V-V_{PFR})}{V_{CSTR}}} & V \geq V_{PFR} \end{cases} \quad (\text{Équation 4.60})$$

#### 4.7.1.10 Modèle des réservoirs en séries

Considérons un nombre  $N$  de réservoirs CSTR en séries, de volume constant et dont le débit est variable dans le temps. L'équation du modèle du réservoir en série peut être adaptée pour tenir compte de la nouvelle variable  $Z$  ainsi :

$$E(V) = \left[ \frac{V}{V_0} \right]^{(N-1)} * \left[ \frac{N^N}{V_0 (N-1)!} \right] \exp \left[ \frac{-NV}{V_0} \right] \quad (\text{Équation 4.61})$$

$$E(Z) = V_0 E(V) = \frac{N^N Z^{N-1}}{(N-1)!} e^{-NZ} \quad (\text{Équation 4.62})$$

où  $Z = V/V_0$  et  $N = V_m^2 / \sigma^2 = V_0^2 / \sigma^2$

### 4.7.2 Système à volume et débit variable

Pour qu'il y ait variation de volume dans un système en continu, il faut nécessairement qu'il y ait une différence entre le débit d'alimentation et de sousverse ( $Q_m \neq Q_{out}$ ). La méthode développée jusqu'à maintenant ne tient pas compte des variations de volume dans le temps et par conséquent une nouvelle méthode doit être introduite.



Considérons l'équation du bilan massique (Équation 4.19) adaptée pour un système à volume et débit variable :

$$Q_{in} C_{in} - Q_{out} C_{out} = \frac{d[VC]}{dt} \quad \text{(Équation 4.63)}$$

Mentionnons qu'il est possible de retrouver une analyse détaillée des calculs pour obtenir une expression de la RTD pour un système à débit et volume variable dans les références bibliographiques<sup>(75)(76)(77)(78)(79)(80)</sup>. L'utilisation du modèle d'écoulement à volume variable n'est pas nécessaire pour analyser les résultats du présent projet de recherche et par conséquent seulement l'expression finale de la RTD est fournie. D'autre part, l'utilisation d'équations pour les modèles d'écoulement à volumes variables sont valables seulement pour des conditions très spécifiques et ne peuvent donc pas être utilisés pour généraliser l'ensemble des situations. Afin de simplifier les calculs mathématiques sous volume et débit variable, considérons la variable adimensionnelle  $Z'$  représentant le nombre de fois que le volume du décanteur s'est écoulé depuis l'injection :

$$Z'(t) = \int_0^t \frac{Q(t)}{V(t)} dt \quad \text{(Équation 4.64)}$$

$$E(Z') \cong \frac{E(t) V(t)}{Q(t)} \quad \text{(Équation 4.65)}$$

#### 4.7.2.1 Réacteur continu parfaitement agité

En effectuant un bilan massique sur un CSTR, avec une injection de traceur sous forme de pulse, l'équation de la  $E(Z')$  obtenue est la même que celle présentée à la section 4.7.1.8.1 en utilisant l'hypothèse des Équations 4.64 et 4.65 :

$$E(Z') = e^{-Z'} \quad (\text{Équation 4.66})$$

#### 4.7.2.2 Réacteur à écoulement piston

Considérons un réacteur à écoulement piston de longueur  $L$  constante, de section  $S$  et dont le fluide à l'intérieur de celui-ci se déplace à une vitesse  $u$ . Dans le cas d'une variation de volume, la valeur de  $S$  et de  $u$  sont considérées constantes pour tout le réacteur mais variables en fonction du temps. Afin de respecter l'équation du bilan massique, certaines hypothèses supplémentaires doivent être faites. Ainsi, la vitesse  $u$  est la même partout dans le réacteur mais change en fonction du temps en considérant que la section  $S$  peut changer en fonction du temps et de la position. Fernandez Sempere et al.<sup>(79)(80)</sup> proposent que la  $E(Z')$  est égale à une fonction Delta Diract apparaissant à la valeur moyenne  $Z'_{moyenne}$  :

$$E(Z') = \delta(Z' - 1) \quad (\text{Équation 4.67})$$

#### 4.7.2.3 *Modèle des réservoirs en série*

Considérons un nombre  $N$  de CSTR en série, de volume et débit variables, avec un temps de résidence identique pour chacun des réservoirs à chaque moment et avec un volume total équivalant à  $N$  fois le volume du dernier réservoir ( $N = \text{constant}$ ). Dans ce cas particulier, l'écoulement dans les  $N$  CSTR est variable ainsi que le volume total et le volume de chacun des CSTR. Néanmoins, le ratio entre le volume et le débit de sousverse (temps de résidence) est le même pour chaque réservoir. Ainsi, une expression similaire à l'Équation 4.62 est obtenue en utilisant l'hypothèse des Équations 4.64 et 4.65 :

$$E(Z') = \frac{E(t) V(t)}{Q(t)} = \frac{N^N Z'^{N-1}}{(N-1)!} e^{-NZ'} \quad (\text{Équation 4.68})$$

### 4.8 Approche expérimentale

Jusqu'à maintenant, la théorie relative à la distribution du temps de résidence et à l'analyse de celle-ci a été décrite. Concrètement, elle est utilisée de différentes façons pour analyser les résultats. En effet, les analyses de RTD sont effectuées soit expérimentalement par un essai de traçages réels dans un milieu donné, soit par étude et simulation à l'aide de modèles et d'équations. La présente section relate quelques exemples de chacun des groupes.

### 4.8.1 Essais expérimentaux

Les essais expérimentaux sont la façon la plus simple d'obtenir des informations nécessaire à l'analyse de la RTD. Néanmoins, la réalisation d'essais expérimentaux est parfois complexe. En effet, le choix du traceur et de la méthode d'analyse ainsi que les variabilités des processus industriels rendent difficile la réalisation des essais de traçage dans des conditions idéales. De plus, l'analyse des courbes de RTD nécessite une bonne connaissance de la théorie. De façon générale, des données de bases, telles que le temps de résidence moyen et la variance, sont obtenues directement via la trace de RTD. Ces essais permettent également d'obtenir des informations sur le type d'écoulement global dans le système. Le Tableau 4.1 présente une série d'exemples d'essais de traçage effectuée expérimentalement ainsi que les résultats obtenus.

| Traceur                                 | Milieu                           | Données obtenues  | Références   |
|---|----------------------------------|---|--|
| Traceurs variés                         | Procédé Bayer                    | $E(t)$ , $E(\theta)$ ,<br>évaluation globale<br>de la trace<br>d'écoulement | (1) (2) (3) (5) (8)<br>(10) (11) (12) (13)<br>(14) |
| Traceur d'encre                         | Clarificateur d'eau              | $E(t)$ et écoulement<br>global  | (18)   |
| Traceur d'encre,<br>Chlorure de lithium | Bassins d'eaux usées             | $E(t)$ , $E(\theta)$ ,<br>écoulement global                                 | (19) (83)  |
| Traceur de billes de<br>verre           | Classificateur<br>solide/liquide | $E(t)$ , évaluation de la<br>recirculation                                  | (84)   |

**Tableau 4.1 – Revue littéraire d'essais de traçage expérimentaux**

### 4.8.2 *Modèles d'équations*

Suite aux essais expérimentaux, certains chercheurs tentent d'interpréter la RTD afin d'expliquer le comportement observé dans la courbe expérimentale. Ainsi, en utilisant un modèle simple (ex : le modèle du réservoir en série ou le modèle compartimenté), ils développent des systèmes d'équations mathématiques adaptés à leur système. Ces modèles sont souvent représentés à l'aide d'un schéma à l'intérieur duquel on retrouve plusieurs éléments en parallèles ou en séries connectés les un aux autres<sup>(85)</sup>. Les différentes sections du schéma représentent ainsi une zone spécifique du système à l'étude. Conséquemment, il est alors possible de quantifier la portion d'écoulement ou le volume associé à chacun des comportements étudiés (exemple : % de volume mort ou % d'écoulement qui court-circuite l'écoulement, etc.). Néanmoins, les modèles développés de cette façon ne sont généralement utilisables que dans les conditions spécifiques de l'expérience et ne peuvent pas être adaptés pour un autre système. Pour la plupart, ces modèles utilisent des paramètres tels que le nombre de Peclet ( $Pe$ ), le coefficient de dispersion ( $D$ ) ou encore le nombre de réservoir en série ( $N$ ), utilisés conjointement avec le temps de résidence moyen  $\tau$ , pour étudier les déviations de l'écoulement par rapport aux modèles idéals CSTR et PFR. Le Tableau 4.2 présente des exemples de systèmes d'équations développés par des chercheurs.

| Milieu à l'étude                                  | Systèmes d'équations  | Modèle de base           | Informations supplémentaires            |
|---|---|--------------------------|---|
| Réservoir de boue d'eaux usées <sup>(4)(86)</sup> | $C = \sum_s f_s \frac{\bar{t}}{t_s} \int_0^t I_t \frac{n_s}{\Gamma(n_s)} \theta_s^{n_s-1} e^{-n_s \theta_s} dt$ | Réservoir en série       | Modèle de Martin ou ETIS                |
| Unité de précipitation <sup>(27)</sup>            | $E_2(t) = \int_0^t E_1(u) E_1(t-u) du$  | Intégrale de convolution | Calcul du % associé à l'écoulement      |
| Écoulement PFR <sup>(87)</sup>                    | $E(t) = C(t) - \frac{\alpha}{1-\alpha} \int_0^t C(t-t_0-t') E(t') dt'$  | Intégrale de convolution | Cas de recirculation                    |
| Bioréacteur <sup>(88)</sup>                       | $E(\theta) = C(\theta) = \frac{N^N \theta^{N-1} e^{-N\theta}}{\Gamma(N)}$                                       | Réservoir en série       | Pour $1 < N < 2$<br>« Forte agitation » |
| Système tubulaire <sup>(89)</sup>                 | $E(t) = \sqrt{\frac{Pe}{4\pi\tau t}} \exp\left(-\frac{Pe(t-\tau)^2}{4t\tau}\right)$                             | Dispersion               | $Pe = f(D \text{ et } Re)$              |

**Tableau 4.2 – Revue littéraire de différents systèmes d'équations développés**

### 4.8.3 Simulations numériques

Les modèles d'équations mathématiques deviennent parfois si complexes qu'ils doivent être résolus à l'aide de logiciel<sup>(4)</sup>. En effet, plus le système à l'étude est vaste et complexe, plus le modèle d'analyse de la RTD doit être adapté pour tenir compte des multiples variations. Pour se faire, on doit alors établir un schéma du réacteur sous forme de réseau complexe. Ces réseaux sont composés de nœuds et de branches. Chaque branche représente un comportement d'écoulement et les nœuds permettent de les connecter les uns aux autres. La création de modèles hydrodynamiques obtenus par la création de réseaux

complexes de réacteurs élémentaires peut permettre d'obtenir des informations plus précises sur un procédé. Des informations de base, telles que le volume et le débit, doivent être ajoutées afin d'effectuer la simulation. Étant donné la complexité des réseaux, une modélisation mathématique est utilisée pour les représenter et un logiciel de simulation numérique est utilisé pour résoudre les équations du bilan massique associées<sup>(90)(91)</sup>.

Il existe plusieurs problèmes à l'utilisation de réseaux complexes. Tout d'abord, le temps de calcul associé est souvent très long. Des modèles plus simples (modèle du réservoir en série) sont alors utilisés pour résoudre des portions du réseau afin d'accélérer le processus de résolution. De plus, les équations sont transformées dans le domaine de Laplace et la méthode des transformées de Fourier est utilisée pour alléger les calculs<sup>(6)(7)(23)(92)</sup>. Un autre inconvénient de l'utilisation de réseaux complexes est qu'ils contiennent tellement de paramètres que deux modèles très différents peuvent répondre de la même façon à un signal d'entrée quelconque, ou encore, un même modèle peut donner des réponses similaires avec des jeux de paramètres différents. Par conséquent, il devient difficile d'interpréter correctement les analyses. Le Tableau 4.3 présente une synthèse littéraire d'analyse de traçage par simulation numérique.



| Milieu à l'étude  | Logiciel  | Modèle de base   | Références               |
|---|---|--|--------------------------|
| Modélisation des zones de sédimentation dans les décanteurs | Logiciel DTS  | Transformée de Laplace, Fourier  | (6) (7) (23)             |
| Modélisation d'un réservoir d'eau                           | CFD   | Modèle des systèmes, hydrodynamique et à l'échelle physique  | (17)                     |
| Modélisation d'un réservoir de sédimentation                | CFDS-FLOW3D, Méthode ADI, Méthode des éléments finis, Flotran | Équations de conservation de la masse, d'énergie et de mouvement et Navier-Stokes, modèle hydrodynamique | (9) (20) (21)            |
| Modélisation d'un clarificateur                             | SIMPLEC, méthode des éléments finis                           | Équation de continuité, de conservation et de mouvement, modèle de turbulence                            | (15) (93)                |
| Modélisation de l'écoulement autour du râteau               | Fortran et CFD  | Volume contrôle et Hershel-Bulkley   | (59)                     |
| Modélisation de l'écoulement d'un puits d'alimentation      | CFD   | Modèle hydrodynamique, de turbulence et à deux phases  | (94) (95) (96) (97) (98) |
| Modélisation d'un décanteur de boue rouge                   | Mathlab   | Conservation de la masse, modèle compartimenté et du réservoir en série                                  | (99)                     |
| Modélisation des courants dans un clarificateur             | Méthode des éléments finis                                    | Modèles hydrodynamiques  | (100)                    |

**Tableau 4.3 – Revue littéraire de différents modèles de simulation développés**



## **CHAPITRE 5**

### **MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE**

Il est important de considérer plusieurs paramètres lors de l'étude des comportements et des déplacements de la boue rouge dans un décanteur. Tout d'abord, il faut recréer les conditions du processus de séparation solide/liquide rencontrées dans le procédé Bayer. Pour se faire, un montage expérimental reproduisant les conditions de décantation des décanteurs industriels a été élaboré. Ensuite, une analyse des types de traceurs disponibles et des conditions chimiques du milieu ont déterminés qu'un traceur de poudre de fer peut simuler adéquatement le déplacement de la boue. De plus, une méthode de détection ferromagnétique du traceur a été développée afin de mesurer la quantité de traceur en continu à la sousverse des décanteurs. Le présent chapitre porte donc sur la description du traceur utilisé, de la méthode de détection ferromagnétique, du montage expérimental, du protocole expérimental ainsi que des variables, paramètres et mesures se reportant aux essais en laboratoire.

## 5.1 Traceur

### 5.1.1 *Type de traceur*

Tel que spécifié dans le Chapitre 1, il existe une grande variété de types de traceur. Le choix du traceur à utiliser dépend des caractéristiques propres au milieu simulé ainsi que de la facilité à détecter le traceur. La plupart des traceurs utilisés sont considérés comme des substances artificielles ajoutées dans l'écoulement d'un système donné pour suivre le mouvement et l'écoulement d'un fluide. Ils peuvent être classifiés en 4 grands groupes : chimique, radioactif, activable et traceur particulaire<sup>(13)</sup>. Les traceurs chimiques utilisés sont souvent des composés ioniques simples comme par exemple le NaCl et ils sont mesurés soit par conductivité électrique ou encore à l'aide d'une électrode. On retrouve également des composés métalliques détectés par spectrométrie d'absorption atomique ou encore des traceurs d'encre détectés par colorimétrie.

Les traceurs radioactifs sont souvent utilisés puisqu'ils sont facilement détectables, même en petite quantité. Il existe une grande variété de traceurs radioactifs d'une durée de vie limitée. Néanmoins, ils sont potentiellement dangereux pour la santé et doivent être manipulés avec soin<sup>(101)</sup>. Les traceurs activables quant à eux, sont des éléments qui sont normalement stables dans le procédé à l'étude mais qui peuvent devenir radioactifs pour réaliser des essais de traçage. Des traceurs d'indium, de lanthane et de samarium sont des exemples de traceurs activables.

Finalement, les traceurs particuliers sont ceux généralement utilisés pour tracer le mouvement des solides dans un système donné. Ces traceurs peuvent être radioactifs ou non. Mentionnons que le traceur particulier doit respecter la distribution de taille de particules du milieu simulé sinon ce dernier ne simulera pas adéquatement le milieu visé et des erreurs peuvent alors se produire lors de l'analyse de la RTD.

### ***5.1.2 Caractéristiques idéales du traceur***

Les caractéristiques idéales du traceur ont été énumérées au Chapitre 1. Rappelons que le choix du traceur utilisé dans un milieu dépend de plusieurs paramètres. Le traceur idéal doit posséder les mêmes caractéristiques d'écoulement que le milieu simulé mais doit être suffisamment différent au niveau de ces propriétés pour qu'il soit facilement détectable. La définition d'un traceur idéal est en soit contradictoire car plus le traceur ressemble au fluide simulé, plus il est difficile de trouver des caractéristiques pour le différencier suffisamment. Par conséquent<sup>(88)</sup> :

- Le traceur doit être miscible et doit posséder des propriétés physiques similaires à celui de milieu à l'étude.
- Le traceur ne doit pas affecter les taux de réactions.
- Le traceur doit être détectable en très petites concentrations et son mode d'introduction ne doit pas perturber l'écoulement.
- Le traceur ne doit pas réagir avec les éléments en présence dans le milieu tels que la liqueur Bayer et la boue rouge.

- Le traceur ne doit simuler qu'une phase du système à l'étude (liquide ou solide).
- La quantité initiale de traceur dans le système à l'étude doit être approximativement nulle.
- Le traceur, la méthode de détection ainsi que tout autre équipement nécessaire à la réalisation de l'essai de traçage doivent être peu coûteux.

### 5.1.3 Type de traceur utilisé

Tel que spécifié dans le chapitre 1, il est très difficile d'effectuer des essais de traçage dans le procédé Bayer, dû aux conditions chimiques agressives du milieu. Des études préliminaires<sup>(1)(3)(5)</sup> ont démontré qu'il était possible de simuler le déplacement des particules de boue grâce à une poudre de fer de diamètre spécifique. Ainsi, selon la loi de Stokes, la vitesse de sédimentation d'une particule sphérique libre est obtenue comme suit :

$$v_s = \frac{g}{18\mu} (\rho_{particule} - \rho_{fluide}) d^2 \quad \text{(Équation 5.1)}$$

Afin d'être considéré comme un traceur adéquat, les particules de fer doivent posséder les mêmes vitesses de sédimentation que les particules de boue rouge qu'elles simulent. Ainsi, le ratio du diamètre des particules de fer par rapport aux particules de boue rouge se définit comme :

$$\left( \frac{d_{particule}}{d_{fer}} \right)^2 = \frac{(\rho_{fer} - \rho_{liqueur})}{(\rho_{particule} - \rho_{liqueur})} \quad \text{(Équation 5.2)}$$

En considérant que la densité de la liqueur Bayer est de  $\sim 1050 \text{ kg/m}^3$ , celle de la boue rouge non floculée  $\sim 3080 \text{ kg/m}^3$  et celle du fer métallique  $\sim 7874 \text{ kg/m}^3$ , l'Équation 5.2 se résume à :

$$d_{\text{particule}} = 1,8 d_{\text{fer}} \quad (\text{Équation 5.3})$$

La valeur 1,8 peut référer à un facteur de forme, qui est généralement associé à l'équation de Stokes pour tenir compte de la non sphéricité des particules. Conséquemment, une particule de fer de dimension et de forme donnée simulera une particule de boue de forme et de dimension similaire. Dans le cas où les particules de boue sont flocuées, la densité des agglomérats diminue, augmentant ainsi la valeur du ratio de l'Équation 5.3. Notons cependant, que la vitesse de sédimentation des agglomérats est considérée retardée, surtout dans la zone près du lit de boue. Par conséquent, l'effet de la floculation n'est pas considéré. Mentionnons cependant qu'une suspension de poudre de fer mélangée à de la liqueur Bayer comporte des propriétés de floculation similaires à celles des particules de boue rouge de même concentration. En résumé, les particules de fer simulent adéquatement le comportement de sédimentation et de floculation des particules de boue rouge.

Lorsque les particules de fer atteignent le lit de boue, qu'elles soient flocuées ou non, elles se déposent à la surface du lit. Si une quantité importante de particules de fer se déposent dans une portion du lit de boue, c'est dernières pourraient s'enfoncer plus rapidement dans le lit, dû à la différence de densité entre les matériels<sup>(102)</sup>. Néanmoins, il a été observé expérimentalement que lorsque des particules de fer sont en contact avec un lit de boue d'une concentration solide similaire à celle rencontrée en industrie

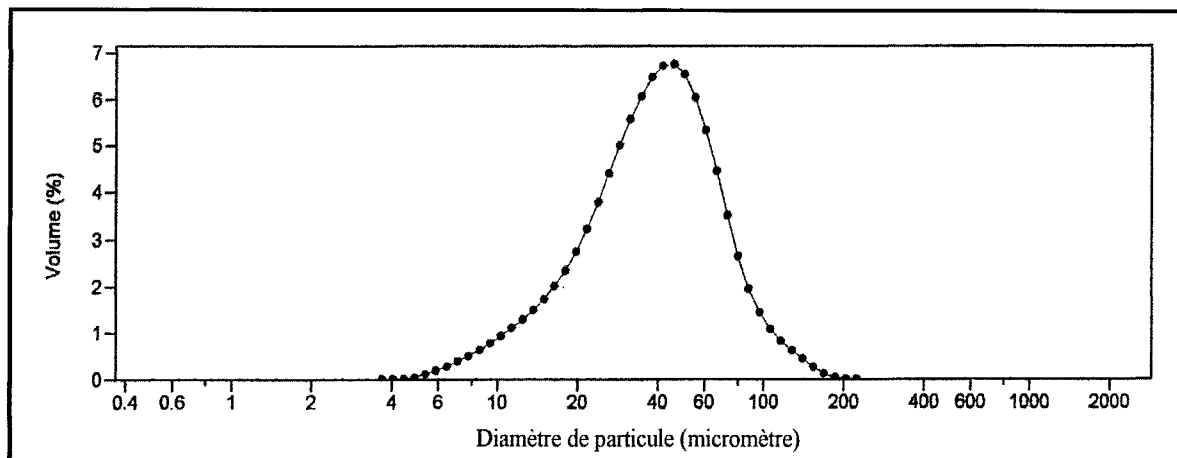
(environ 50 % p/p), celles-ci ne se déplacent pas plus rapidement. En effet, la compaction de la boue dans le lit rend négligeable le rapport de densité (les particules de fer se comportent comme des particules de boue).

D'autre part, des particules d'oxyde de fer sont déjà présentes dans la bauxite, ainsi le fer ajouté n'aura pas d'interférence avec le procédé de séparation solide/liquide ni avec l'alumine en solution. En effet, le fer ajouté ne réagit pas avec le milieu (aucune interaction chimique) et est donc un traceur de type conservateur. De plus, la poudre de fer ne se dégrade pas dans le milieu chimique du procédé Bayer, n'est pas toxique pour l'environnement et elle ne nécessite pas des méthodes de manipulation particulières. Par ailleurs, les propriétés ferromagnétiques du fer ne sont pas influencées par les conditions spécifiques rencontrées dans le procédé Bayer. Conséquemment, la poudre de fer semble être un traceur idéal pour simuler le comportement et le déplacement de la boue.

#### ***5.1.4 Caractéristiques physiques du traceur***

La bauxite, une fois broyée, possède des particules dont le diamètre peut varier entre 1 et 100  $\mu\text{m}$  (Annexe A). Ainsi, en utilisant une poudre de fer d'un diamètre moyen (environ 40  $\mu\text{m}$ ), il est possible de simuler les déplacements de la boue. La Figure 5.1 présente une analyse granulométrique des particules de fer utilisées au cours des expérimentations. La taille moyenne des particules de fer est  $\sim 43,58 \mu\text{m}$ . La poudre de fer utilisée au cours des expérimentations provient de l'industrie Hosokawa Micron Ltd. Elle a été traitée au broyeur à jet afin de réduire la granulométrie au diamètre moyen demandé. Il

est possible d'obtenir des particules de fer de diamètres inférieurs, cependant le coût d'achat est plus élevé (les particules de fer doivent être traitées plus longtemps afin d'en réduire le diamètre moyen). Spécifions également que plus la poudre de fer est traitée longtemps (granulométrie plus fine), plus les propriétés ferromagnétiques des poudres de fer peuvent diminuer. En effet, la taille des domaines magnétiques à l'intérieur du fer peut diminuer avec les chocs répétitifs subis, entraînant ainsi une diminution notable des propriétés magnétiques des particules de fer et rendant leurs détections plus difficiles<sup>(103)(104)</sup>. De plus, des effets d'oxydation de la surface des grains peuvent également contribuer à la diminution des propriétés magnétiques<sup>(105)(106)</sup>. D'autre part, la poudre de fer utilisée dans le présent projet était déjà disponible dans les laboratoires du GRUSSL et c'est pourquoi elle a été utilisée.



**Figure 5.1 – Granulométrie de la poudre de fer**

## 5.2 Méthode de détection ferromagnétique

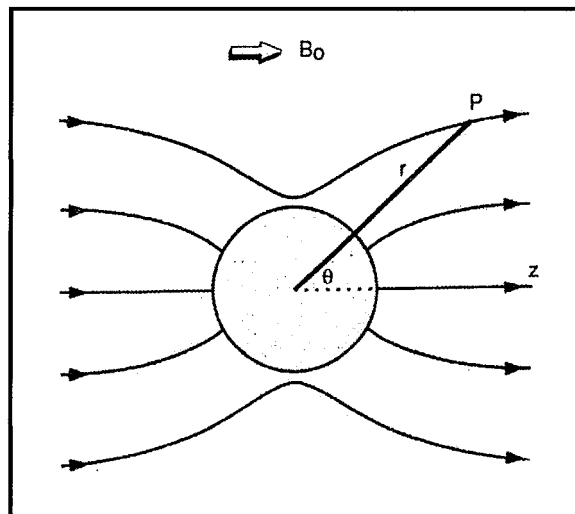
### 5.2.1 *Principe de fonctionnement*

Le principe de la méthode de traçage ferromagnétique a initialement été développée en 2002<sup>(1)(3)(5)</sup>. Cette méthode est assez simple et consiste à simuler le comportement de sédimentation de la boue avec un traceur de poudre de fer. La méthodologie de détection proposée consiste à utiliser un traceur ferromagnétique dans les boues rouges et à détecter celui-ci grâce à une bobine d'induction, ce qui permet d'évaluer la RTD et d'analyser le comportement de déplacement de la boue. Ainsi, au cours d'une expérimentation, une quantité donnée d'un traceur ferromagnétique est mélangée avec les particules solides au niveau de l'alimentation du décanteur. Ce traceur a un comportement similaire à la boue et une bobine d'induction, placée à la sortie des décanteurs, permet de détecter le passage du traceur (variation de la perméabilité magnétique de la boue rouge en fonction de la concentration de fer). Le principe de fonctionnement de cette méthode de détection est assez innovateur. En effet, suite à des recherches bibliographiques, il existe très peu de références sur un processus de traçage similaire. En fait, une technique de traçage ferromagnétique a été utilisée pour évaluer le temps de résidence des extrudeuses à vis<sup>(107)(108)(109)(110)</sup>. Ainsi, en utilisant des bobines d'induction dans un circuit spécifique contenant un pont de Wheatstone, ils ont pu évaluer la présence de fer grâce à des variations de tension aux bornes de résistances. Ces articles fournissent très peu d'informations quant au circuit développé et n'ont pas servi lors de la conception de l'appareil de mesure du fer utilisé dans le présent projet.



### 5.2.2 Rappels théoriques

Afin de mieux comprendre le principe de fonctionnement de la méthode de détection ferromagnétique, quelques rappels théoriques s'imposent. Considérons une particule sphérique de fer, introduite dans un champ magnétique uniforme<sup>(106)</sup>. Les propriétés magnétiques de la particule de fer déforment les lignes du champ magnétique, tel que présenté à la Figure 5.2. En effet, en présence d'une substance ferromagnétique, les lignes de champ se concentrent à l'intérieur de celui-ci.



**Figure 5.2 – Influence d'une particule de fer dans un champ magnétique uniforme**

Il est possible de mesurer la densité du flux magnétique  $\vec{B}$  grâce à l'Équation 5.4. Le terme  $\mu_0$  réfère à la perméabilité du vide ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m),  $\mu_r$  à la perméabilité relative du milieu par rapport au vide et  $\vec{H}$  à l'intensité du champ magnétique.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{Équation 5.4})$$

### 5.2.2.1 Bobine d'induction

Il est possible de créer un champ magnétique de différentes façons. Dans le cadre du présent projet, une bobine d'induction à laquelle est appliqué un faible courant alternatif «  $I$  » permet de créer le champ magnétique. Une bobine d'induction est composée d'un cylindre de longueur «  $l$  » et de rayon «  $R$  » sur lequel un fil de cuivre est enroulé «  $N$  » fois. L'espacement entre les enroulements du fil est considéré petit par rapport au rayon de la bobine. Le champ magnétique formé est de symétrie cylindrique et les lignes de champs sont parallèles à l'axe de la bobine à l'intérieur de celle-ci tandis que les lignes extérieures sont plutôt courbes et relient les deux extrémités de la bobine. La Figure 5.3 illustre une représentation schématique d'une bobine d'induction et de l'aspect des lignes de champs formées. L'inductance «  $L$  » de la bobine d'induction relie le champ magnétique au courant appliqué et est également reliée à la géométrie de la bobine (Équation 5.5)<sup>(111)</sup>. Donc, toute variation de la perméabilité magnétique de la bobine est quantifiable grâce à la mesure de l'inductance.

$$\vec{B} = \frac{L I}{N \pi R^2} \quad \text{et} \quad L = \mu_r \mu_0 N^2 \pi \frac{R^2}{l} \quad (\text{Équation 5.5})$$

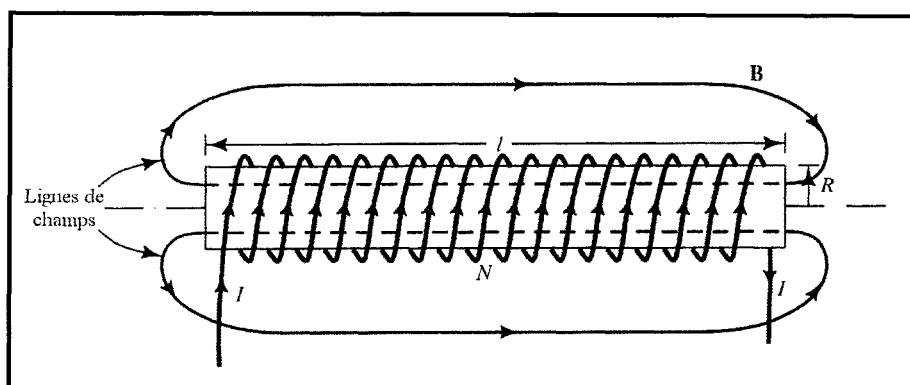


Figure 5.3 – Bobine d'induction et lignes de champ magnétique

L'appareil de mesure de la concentration de fer a été construit afin de permettre la mesure en continu de la quantité de fer à la sousverse d'un décanteur. Cet appareil a été modifié plusieurs fois mais le principe de fonctionnement est toujours resté le même. Ce dernier consiste à générer un champ magnétique autour d'une bobine d'induction spécifique en lui appliquant un courant « I ». Ainsi, lorsque les particules de fer circulent à l'intérieur de la bobine, la densité du champ magnétique s'en trouve affectée. En effet, la perméabilité relative «  $\mu_r$  » de la bobine d'induction varie en fonction de la quantité de particules de fer qui la traverse. Autrement dit, la bobine d'induction est sensible à la perméabilité magnétique du milieu. La Figure 5.4 présente les différences de densité du champ magnétique entre l'air et le fer dans une bobine d'induction.

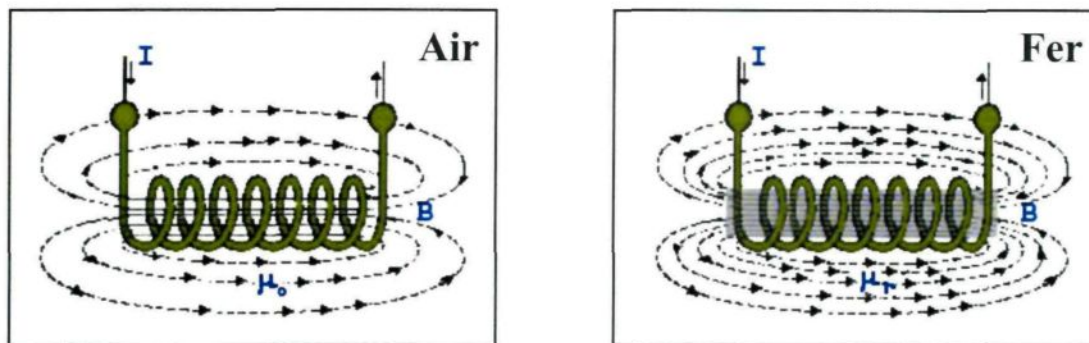


Figure 5.4 – Densité du champ magnétique dans l'air et le fer

#### 5.2.2.1.1 Perméabilité relative du fer

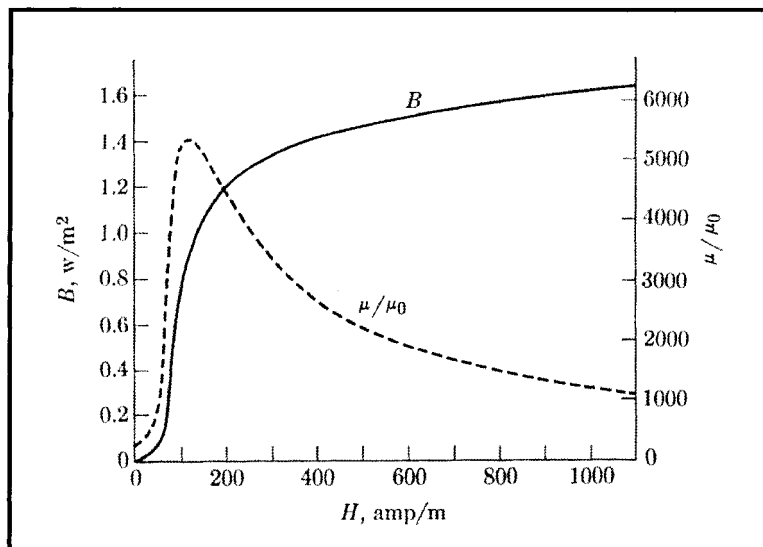
La perméabilité relative est un paramètre très important à considérer dans l'élaboration de la technique de traçage ferromagnétique. Pour des matériaux non magnétiques, elle est considérée égale à 1 (ces matériaux ne concentrent pas les lignes de

champ). Pour des matériaux magnétiques, la perméabilité relative varie en fonction de leurs compositions. Les valeurs de perméabilité relative sont obtenues grâce à des courbes expérimentales nommées courbes d'aimantation. Une approximation mathématique (Équation 5.6) peut être utilisée pour décrire les courbes d'aimantation.

$$\vec{B} = \mu_M \vec{H} \quad \text{(Équation 5.6)}$$

$$\mu_M = \mu_r \mu_0 \quad \text{(Équation 5.7)}$$

L'Équation 5.7 permet de calculer la perméabilité absolue  $\mu_M$  du matériel. Par exemple, la perméabilité magnétique relative de la boue obtenue pour différents essais de traçage est  $\sim 1$  (0,99 à 1,06) et  $\mu_M \approx \mu_0$ . Dans le cas du fer, considéré comme un matériel ferromagnétique, la perméabilité relative ne varie pas linéairement mais dépend de l'intensité du champ magnétique. Ainsi, pour des valeurs intermédiaires de  $\vec{H}$ , la perméabilité relative peut être très élevée. Néanmoins, la valeur de  $\mu_r$  diminue pour de grandes valeurs de  $\vec{H}$ , ce qui correspond à l'atteinte d'un certain seuil de saturation. Pour de faible valeur de  $\vec{H}$ , la perméabilité magnétique est faible. Autrement dit, la perméabilité des matériaux ferromagnétiques peut prendre n'importe quelle valeur<sup>(112)</sup>. Un exemple de courbe d'aimantation du fer est présenté à la Figure 5.5<sup>(103)</sup>. Ainsi, la perméabilité relative maximale du fer est d'environ 5500 pour une intensité magnétique d'environ 125 A/m<sup>(113)</sup>. Néanmoins, pour une intensité magnétique inférieure à 40 A/m, la perméabilité relative obtenue n'est que de 700. Les courbes de première aimantation du fer indiquent que la perméabilité relative initiale des poudres de fer peut être aussi faible que 150<sup>(3)(103)(113)(114)</sup>.



**Figure 5.5 – Courbe d'aimantation du fer**

En considérant qu'une fraction volumique  $x_i$  de la bobine d'induction est occupée par la  $i^{\text{ième}}$  substance magnétique, la perméabilité relative de la bobine devient alors ;

$$\mu_r = \sum x_i \mu_i \quad (\text{Équation 5.8})$$

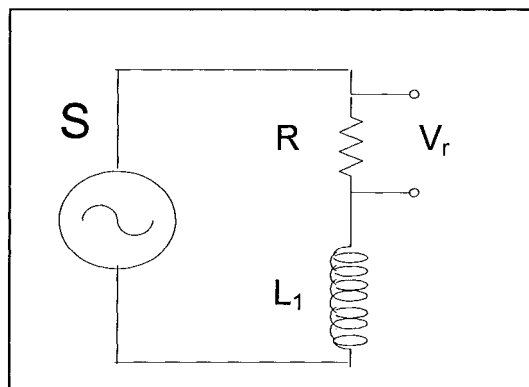
La valeur  $\mu_i$  fait référence à la perméabilité magnétique relative de la  $i^{\text{ième}}$  substance magnétique. La somme des fractions volumiques est égale à 1. La fraction volumique de la bobine occupée par la  $i^{\text{ième}}$  substance magnétique est reliée à la masse  $m_i$  de cette substance, à sa densité  $\rho_i$  et au volume interne de la bobine  $V_{\text{bobine}}$  par conséquent :

$$x_i = \frac{m_i}{\rho_i V_{\text{bobine}}} \quad (\text{Équation 5.9})$$

Conséquemment, l'inductance de la bobine d'induction est proportionnelle à la masse des substances magnétiques qu'elle contient.

### 5.2.3 Première version de l'appareil de mesure du fer

Initialement<sup>(1)(3)(5)</sup>, l'appareil de mesure du fer était doté d'un circuit  $RL$  alternatif (Figure 5.6), afin de quantifier les variations du champ magnétique de la bobine d'induction. Ainsi, en mesurant la tension aux bornes d'une résistance «  $R$  » branchée en série avec la bobine d'induction «  $L_1$  », il a été possible d'établir une corrélation entre la quantité de fer introduite dans la bobine et la tension. La mesure des tensions «  $V_r$  » était effectuée à l'aide d'un multimètre de type Agilent 34401A.

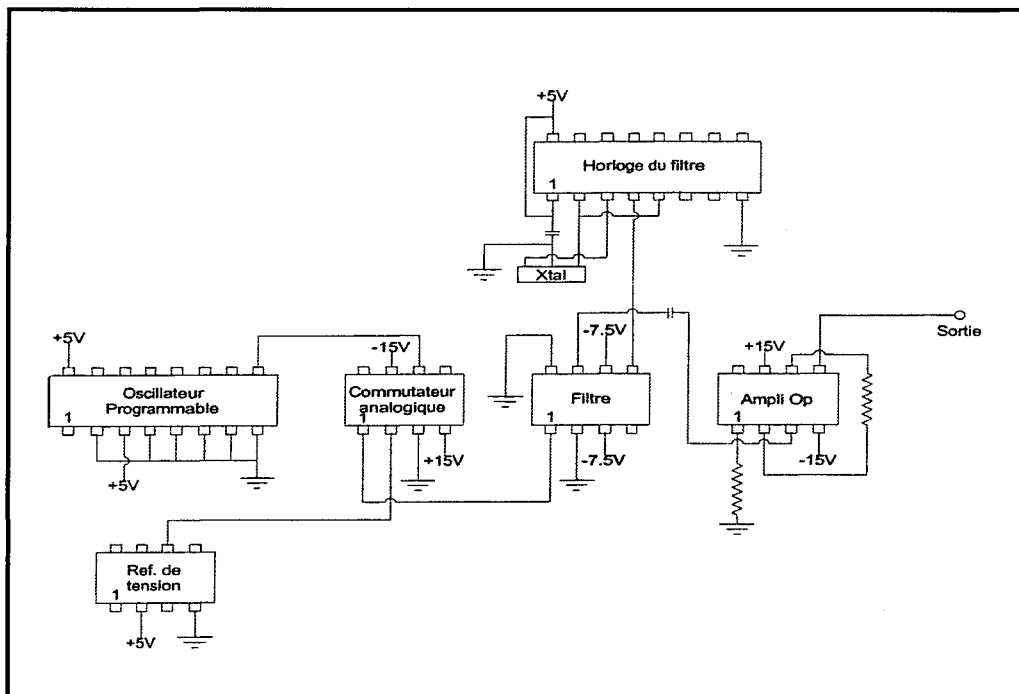


**Figure 5.6 – Circuit RL de la première version de l'appareil de mesure du fer**

La source «  $S$  » utilisée devait être très stable afin de limiter toutes variations de tension aux bornes de la résistance qui n'étaient pas dues à la présence de fer (mesure seulement la variation de l'impédance  $L_1$  due au fer). L'inductance de la bobine peut être mesurée à partir de la réactance. La réactance inductive représente la résistance qu'opposent les éléments inductifs au passage du courant :

$$X_L = j 2 \pi f L \quad \text{(Équation 5.10)}$$

où  $f$  est la fréquence de tension sinusoïdale appliquée à la bobine et  $j$  est le nombre imaginaire ( $j = \sqrt{-1}$ ). Une fréquence élevée est donc souhaitable pour maximiser les effets inductifs de la bobine. Puisque toute variation de la réactance est interprétée comme une variation de la masse des substances contenues dans la bobine, la fréquence d'excitation doit être très stable. Une source de tension sinusoïdale de 3,932 V RMS oscillant à  $30 \text{ KHz} \pm 1 \text{ Hz}$  a été fabriquée (Figure 5.7)<sup>(3)</sup>.



**Figure 5.7 – Schéma de la source**

### 5.2.3.1 Branche de référence

Diverses modifications ont ensuite été apportées à l'appareil de mesure du fer pour diminuer la limite de détection. Tout d'abord, il y a eu l'ajout d'une branche de référence.

Cette dernière permet de mesurer toute variation de tension de la source de façon à éliminer cette variation dans la branche de mesure. Deux résistances de précision ont alors été utilisées. Les mesures de tension dans la branche de référence sont effectuées à l'aide d'un second appareil de mesure Agilent. L'inconvénient à l'utilisation de deux appareils de mesure est que dans le temps, les deux appareils dévient différemment l'un de l'autre induisant ainsi une erreur de dérive entre les mesures. De plus, malgré l'ajout de la branche de référence, l'appareil de mesure était toujours très sensible aux bruits ambiants en agissant comme une antenne<sup>(115)</sup>.

#### ***5.2.4 Deuxième version de l'appareil de mesure du fer***

La version actuelle du circuit de l'appareil de mesure est présentée à la Figure 5.8. Cette version a été adaptée pour minimiser les bruits présents sur le signal de mesures en mesurant la fréquence de résonance «  $f_{résonance}$  » d'un circuit  $LC$  plutôt que la tension aux bornes d'une résistance. En effet, à l'inverse de la mesure de l'amplitude d'un signal (voltage), la mesure de la période (fréquence) est beaucoup moins affectée par la présence de bruit. Donc, l'utilisation d'un circuit  $LC$  est avantageuse. La réactance capacitive d'un condensateur est reliée à la fréquence par :

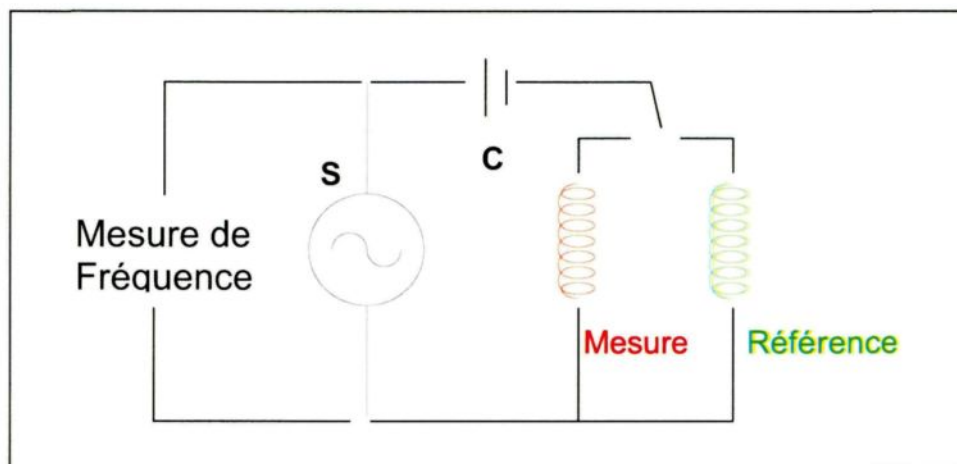
$$X_C = \frac{1}{j 2 \pi f C} \quad \text{(Équation 5.11)}$$

À l'approche de la fréquence de résonance d'un circuit  $LC$  en série, le courant augmente tandis que la tension diminue. Lorsque  $X_L$  correspond à  $X_C$ , la fréquence de résonance est atteinte<sup>(115)</sup>. Concrètement, la fréquence de résonance est le résultat d'une



accumulation d'énergie dans le circuit  $LC$  et il est possible de l'obtenir via l'Équation 5.12. Cette accumulation d'énergie provoque une variation/augmentation des oscillations (amplitude ou période selon le type de circuit). La fréquence de résonance du circuit  $LC$  utilisé se situe aux alentours de 30 KHz.

$$f_{\text{résonance}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{Équation 5.12})$$



**Figure 5.8 – Circuit LC de l'appareil de mesure du fer**

La branche de référence de cette version est constituée d'une seconde bobine d'induction. Cette dernière, nommée bobine de référence, permet de mesurer toutes les variations de tension de la source ainsi que les changements dans le champ magnétique entourant la bobine de mesure. Autrement dit, la bobine de référence permet de soustraire aux mesures une partie des bruits nuisibles induits par le milieu ambiant. Par ailleurs, le circuit a également été adapté afin qu'un seul appareil de mesure (Data Acquisition / Switch Unit HP 34970A) soit utilisé. L'utilisation d'un seul appareil de mesure permet

d'éliminer la dérive entre les mesures des deux branches. Finalement, des thermocouples ont également été ajoutés à chacune des bobines d'induction. Ces thermocouples permettent de mesurer toutes les variations de température qui pourraient induire une imprécision dans les mesures.

Le circuit utilisé est inséré dans une cage de Faraday pour limiter les bruits électromagnétiques pouvant influencer le champ magnétique des bobines et les mesures obtenues<sup>(115)</sup>. Cette cage permet également de protéger les bobines et les composantes électriques du circuit de mesure. Les bobines utilisées sont fabriquées à la main de façon à ce qu'elles soient identiques. Elles sont constituées d'un fil de cuivre (calibre # 30 AWG, de 0,28 mm de diamètre) enroulé en une seule épaisseur autour d'un support cylindrique en bakélite (42,88 mm de diamètre par 154,42 mm de long) pour effectuer un bobinage de 554 tours. La bakélite a été choisie comme matériel de support puisqu'elle possède un faible coefficient de dilatation thermique et les dimensions de la bobine peuvent alors être considérées comme constantes dans la plage de température rencontrée en usine. La taille et les dimensions de la bobine ont été préalablement élaborées lors de la première version de l'appareil. La Figure 5.9 présente une image des bobines de mesure et de référence. L'appareil de mesure de la fréquence, la source ainsi que l'ordinateur permettant l'acquisition de données sont installés sur une table amovible près de la cage de Faraday (Figure 5.10).

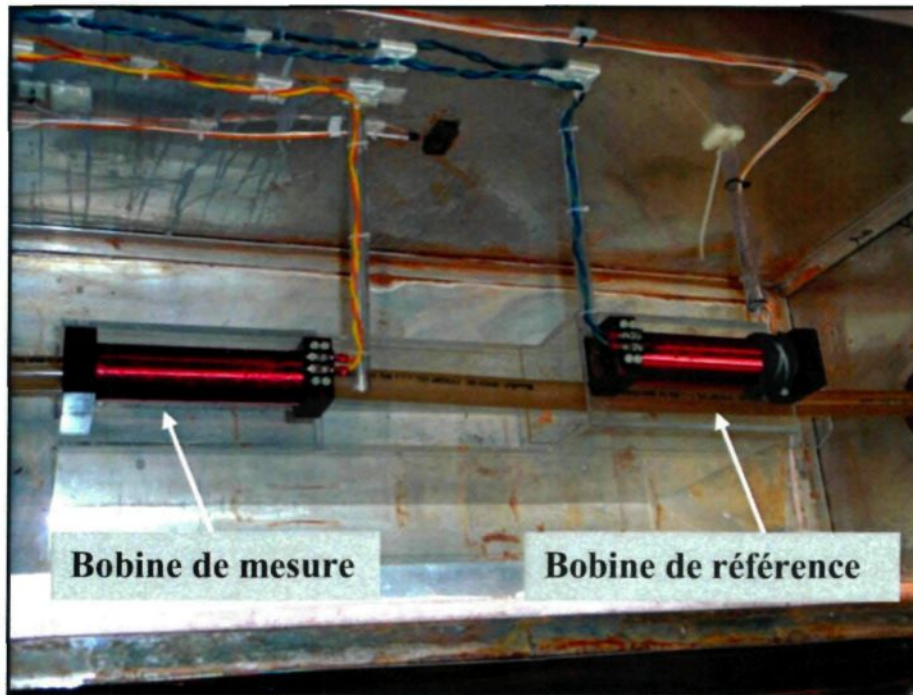


Figure 5.9 – Bobine de mesure et bobine de référence

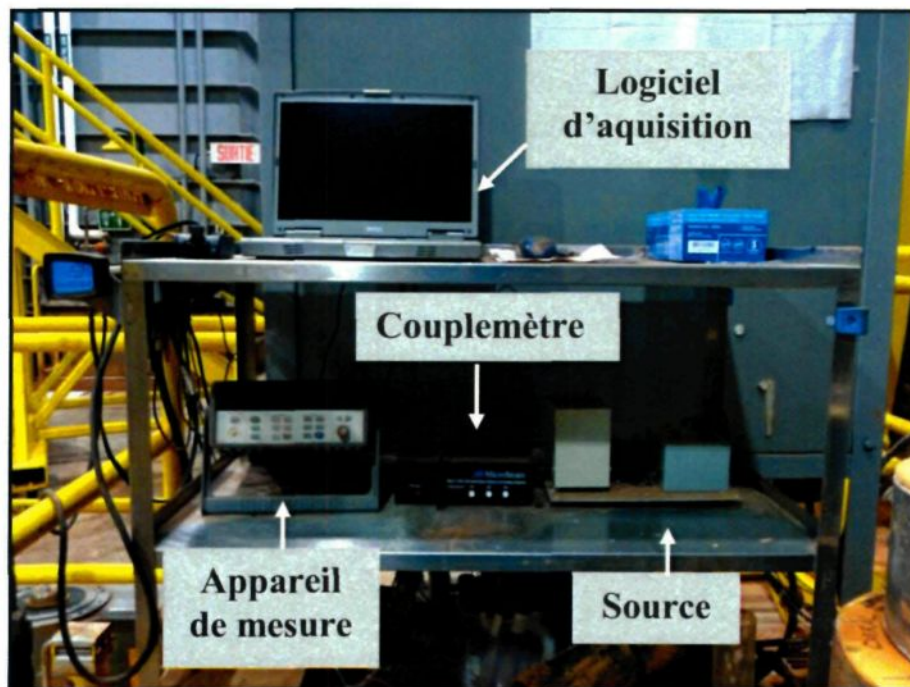


Figure 5.10 – Appareil de mesure et source de l'appareil de mesure

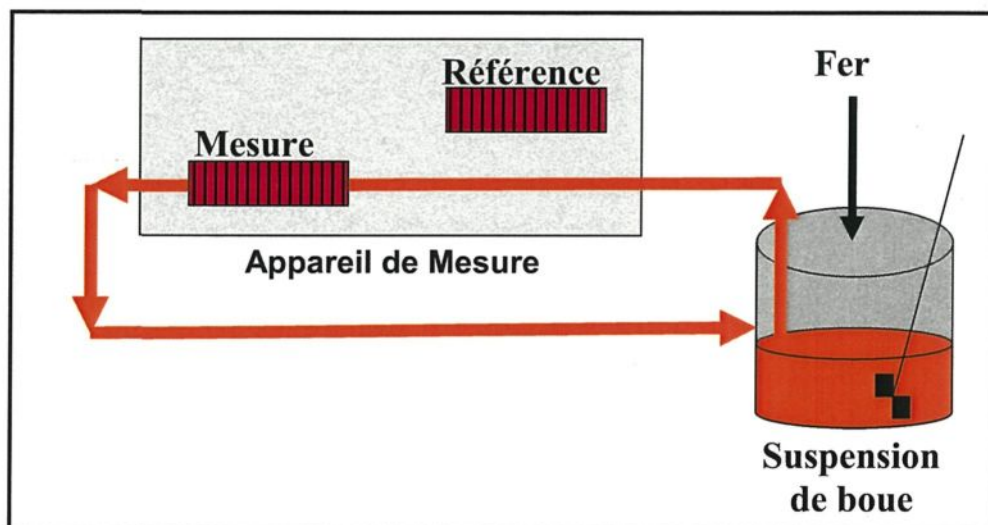
#### **5.2.4.1     *Délai d'échantillonnage***

Lorsqu'on effectue un essai de traçage, il est important que le nombre de mesures effectuées à la sousverse soit suffisant pour tracer une courbe de RTD. Si le nombre de mesures est insuffisant, il est possible de manquer certaines informations<sup>(18)</sup> ou petits pics sur la RTD. À cette fin, un logiciel d'acquisition de données a été réalisé. Ce logiciel permet de définir le délai entre chaque mesure. Dans tous les essais, le délai d'échantillonnage choisi est de 12 secondes. Ainsi, à chaque 12 sec, une mesure de la bobine de référence et de la bobine de mesure sont effectuées. Le délai de 12 secondes est le temps minimal requis par l'appareil de mesure pour effectuer les mesures dans les deux branches du circuit.

#### **5.2.4.2     *Calibration de l'appareil de mesure***

L'efficacité de la méthode de détection repose sur la facilité de l'appareil de mesure à détecter de faibles concentrations de fer (limite de détection) et à reproduire ces mesures de façon à obtenir un bon degré de reproductibilité. Par conséquent, divers essais de calibration ont été effectués afin d'évaluer les différents paramètres influençant l'appareil de mesure. Le premier type d'essais a été réalisé avec des échantillons d'une quantité spécifique de poudre de fer. Deux types d'échantillons ont ainsi été fabriqués : mélange fer-farine et mélange fer-suspension de boue rouge (~ 50 % p/p). Les échantillons sont contenus dans des éprouvettes avec bouchon et introduits dans la bobine de mesure à l'aide d'une petite perche. Le second type d'essais de calibration a été effectué à l'aide d'un circuit de recirculation de la suspension de boue. Pour ce faire, 6,0 L de suspension de boue

rouge (de concentrations solides variables) sont agités dans un récipient puis introduits dans l'appareil de mesure à l'aide d'une pompe péristaltique et d'un tuyau. Après 5 min, la circulation de la boue est arrêtée et une quantité de poudre de fer est ajoutée et mélangée à la suspension à l'aide d'un agitateur électrique. Au bout de 5 min, la boue est de nouveau recirculée et mesurée et ainsi de suite. L'avantage d'un circuit de recirculation est qu'il permet d'évaluer les variations de fréquence pour des concentrations de fer dans un système en mouvement tel que lors des essais expérimentaux. La Figure 5.11 schématise le circuit de recirculation de la suspension de boue.



**Figure 5.11 – Circuit de recirculation d'une suspension de boue rouge**

#### **5.2.4.2.1 Limite de détection**

##### **5.2.4.2.1.1 Échantillons**

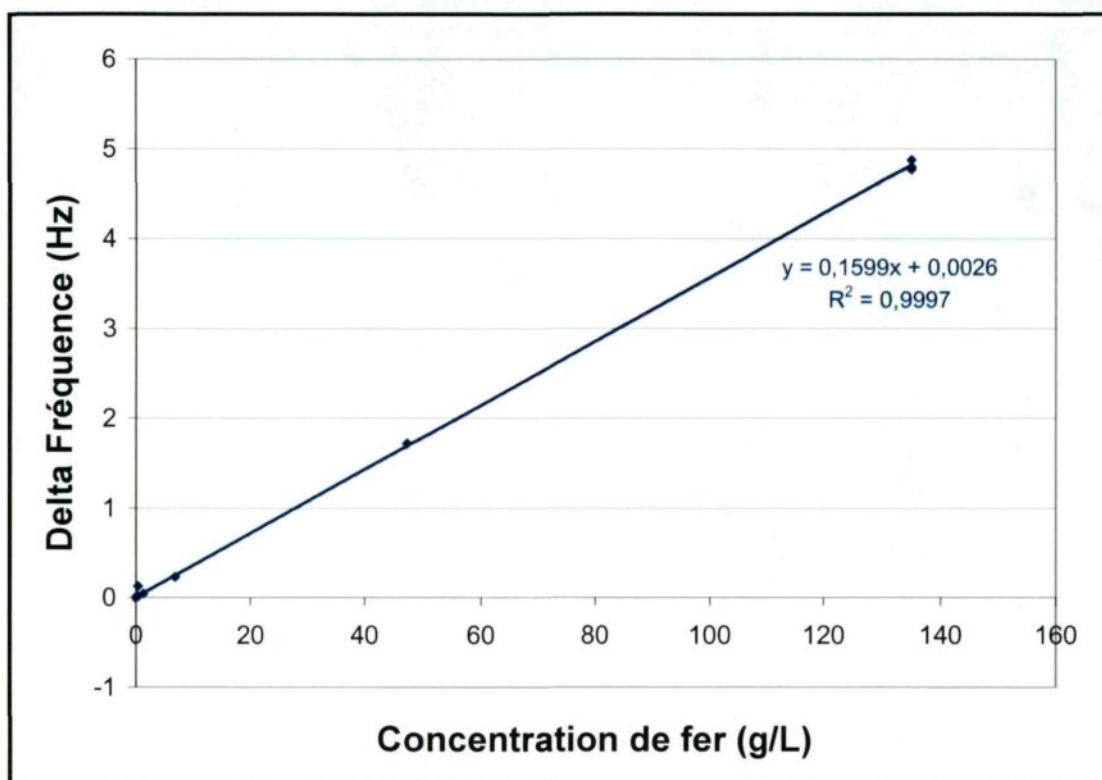
Les installations industrielles du procédé Bayer sont très grandes. Ainsi, les quantités de traceur utilisées pour obtenir une faible limite de détection sont tout de même

importantes. Par conséquent, la limite de détection de l'appareil de mesure du fer est très importante. Cette dernière est évaluée de deux façons : avec des échantillons statiques de fer et avec une recirculation de la boue. La limite de détection se définit comme étant la plus petite concentration de particule de fer pouvant être détectée grâce à l'appareil de mesure avec une incertitude acceptable dans les conditions d'expérimentation et qui est statistiquement différente du signal produit par un blanc dans les mêmes conditions<sup>(115)</sup>. Règle générale, la limite de détection doit être égale à deux ou trois fois celle de l'écart-type obtenue pour un blanc.

La Figure 5.12 présente la courbe de calibration obtenue pour trois séries d'essais de variation de la concentration de poudre de fer dans des échantillons statiques de farine. L'ordonnée du graphique « Delta Fréquence » représente la différence entre la mesure de fréquence associée au milieu zéro (farine sans poudre de fer) et la mesure de fréquence de l'échantillon fer/farine. De plus, chaque mesure de fréquence utilisée résulte de la différence obtenue entre la mesure de fréquence de la bobine de référence et de la bobine de mesure. L'abscisse « Concentration de fer » présente la concentration de poudre de fer (g/L) dans l'échantillon. Les variations de fréquence sont souvent petites, surtout pour des petites concentrations de fer. Ainsi, les mesures de fréquences sont précises au sixième chiffre après le point. Les concentrations de fer varient entre 0,0233 et 135,1265 g de fer par litre. Le coefficient de corrélation linéaire de la courbe est de 0,9997. Il est possible d'évaluer la limite de détection en analysant la portion de la courbe pour des concentrations de fer inférieures à 0,5000 g/L. Ainsi, la valeur moyenne obtenue lors de la mesure de



l'échantillon de farine est de 0,001712 Hz avec un écart-type moyen de 0,000286. La limite de détection de l'appareil de mesure du fer pour des échantillons de farine est égale à 3 fois l'écart-type obtenu et représente une concentration de fer de 0,0500 g/L. L'appareil de mesure du fer possède donc une très bonne limite de détection lorsque utilisé avec des échantillons statiques de fer/farine.



**Figure 5.12 – Courbe de calibration pour des échantillons de fer/farine**

Des résultats similaires sont obtenus pour des échantillons statiques de boue rouge mélangés avec des concentrations de poudre de fer. Les échantillons ont été préparés avec une suspension de boue rouge d'environ 50 % p/p. Une plaque agitatrice a été utilisée pour s'assurer de l'uniformité du mélange fer/boue. Néanmoins, il est difficile de maintenir

l'uniformité des échantillons de boue. En effet, à l'inverse des échantillons avec la farine, les échantillons de boue ont tendance à décanter dans le contenant. La Figure 5.13 présente un essai de calibration effectué avec des échantillons statiques de boue rouge. La concentration des échantillons de fer varie de 0,0250 à 0,5600 g/L. Le coefficient de corrélation linéaire est de 0,9941. L'écart-type moyen obtenu en répétant trois fois la mesure de la suspension de boue rouge « blanc » est similaire à celui obtenu pour les échantillons de farine. Conséquemment, la limite de détection est du même ordre de grandeur que celle obtenue précédemment. Notons qu'il est possible de détecter une concentration de fer inférieure à la limite de détection de 0,0500 g/L mais que sa mesure est alors imprécise.

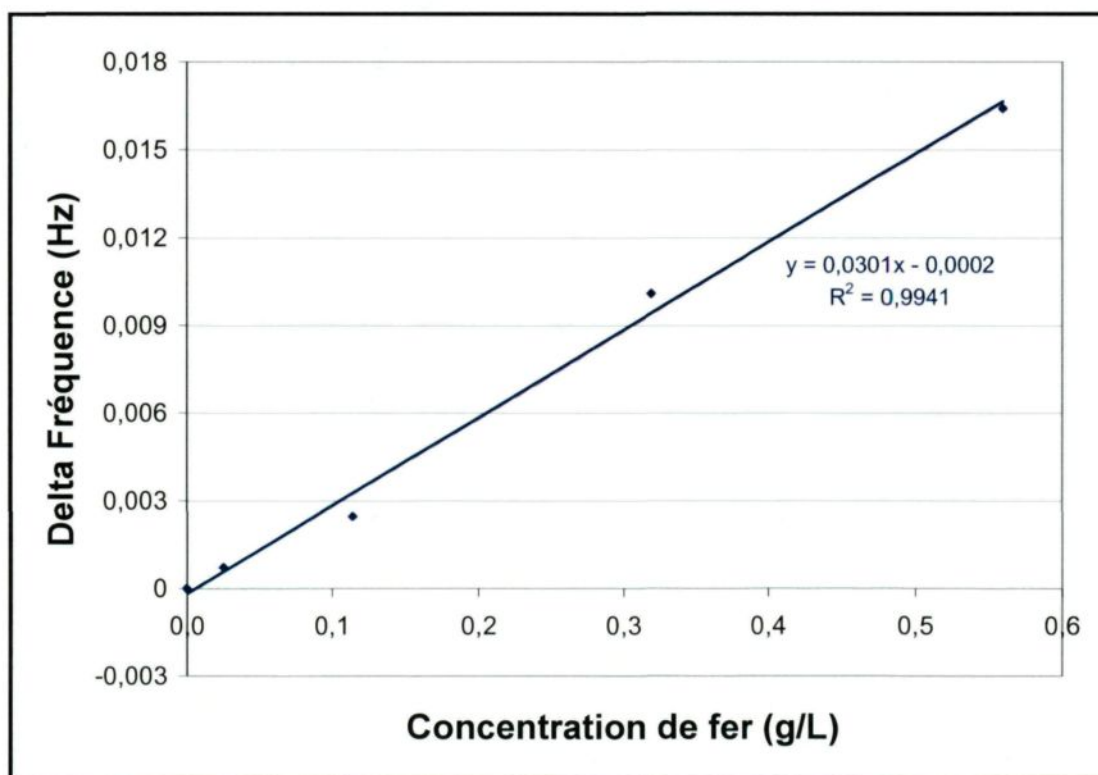
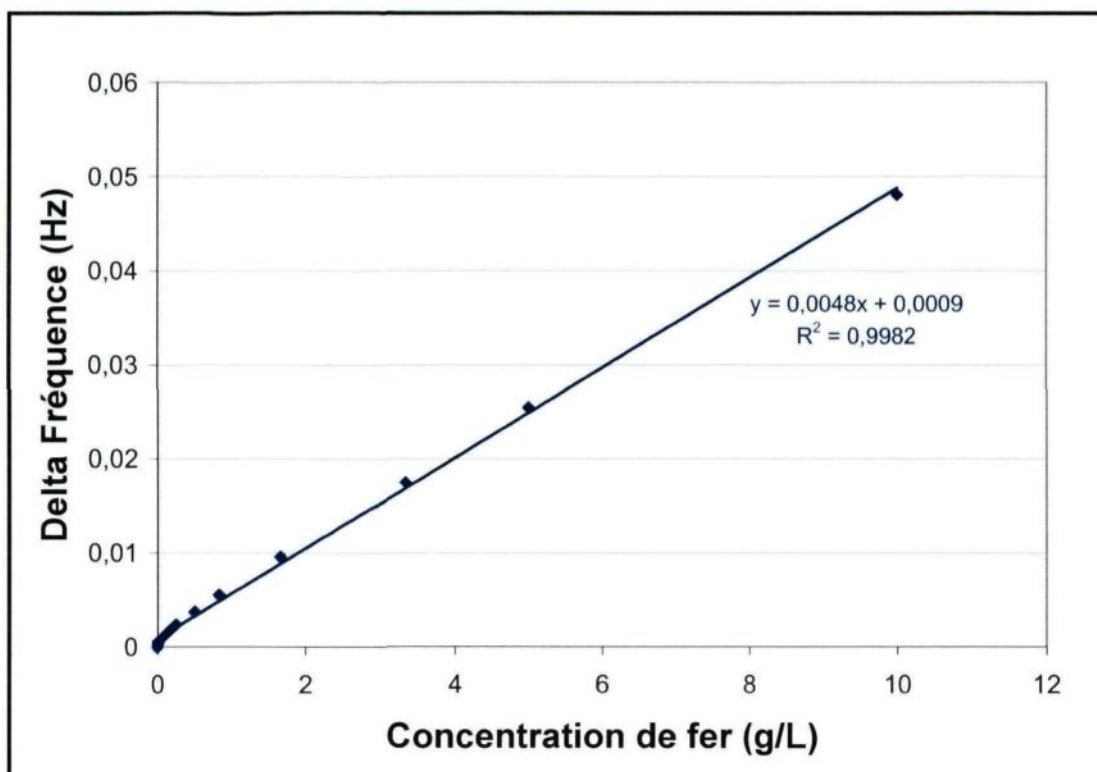


Figure 5.13 – Courbe de calibration pour des échantillons de fer/boue rouge



#### 5.2.4.2.1.2 Circuit de recirculation

Jusqu'à présent, des échantillons statiques de poudre de fer dans un milieu donné ont été utilisés pour déterminer la limite de détection de l'appareil de mesure du fer. Cependant, lors des essais expérimentaux, l'appareil de mesure du fer effectuera des lectures en continu sur une conduite de boue. Par conséquent, il est pertinent d'évaluer la limite de détection avec un échantillon de boue en circulation sous l'action d'une pompe péristaltique. Une valeur de delta fréquence moyen de 0,001273 Hz est obtenue pour une circulation de boue rouge à 44 % p/p pour une durée de 30 min. Un écart-type de 0,000485 est obtenu pour ces mesures. Ainsi, une limite de détection d'environ 0,1000 g de fer par litre de boue est obtenue. Cette limite est supérieure à celle obtenue avec des échantillons statiques mais inférieure à celle obtenue avec la première version de l'appareil de mesure du fer (0,5000 g/L). Bien évidemment, la limite de détection est valide pour un système à l'équilibre (conditions constantes : température, débit, concentration solide % p/p, etc.). La Figure 5.14 présente les résultats obtenus pour une recirculation d'une suspension de boue rouge de 44 % p/p. Les concentrations de fer varient entre 0,0019 et 10,0001 g/L.



**Figure 5.14 – Courbe de calibration pour un circuit de recirculation de la boue rouge**

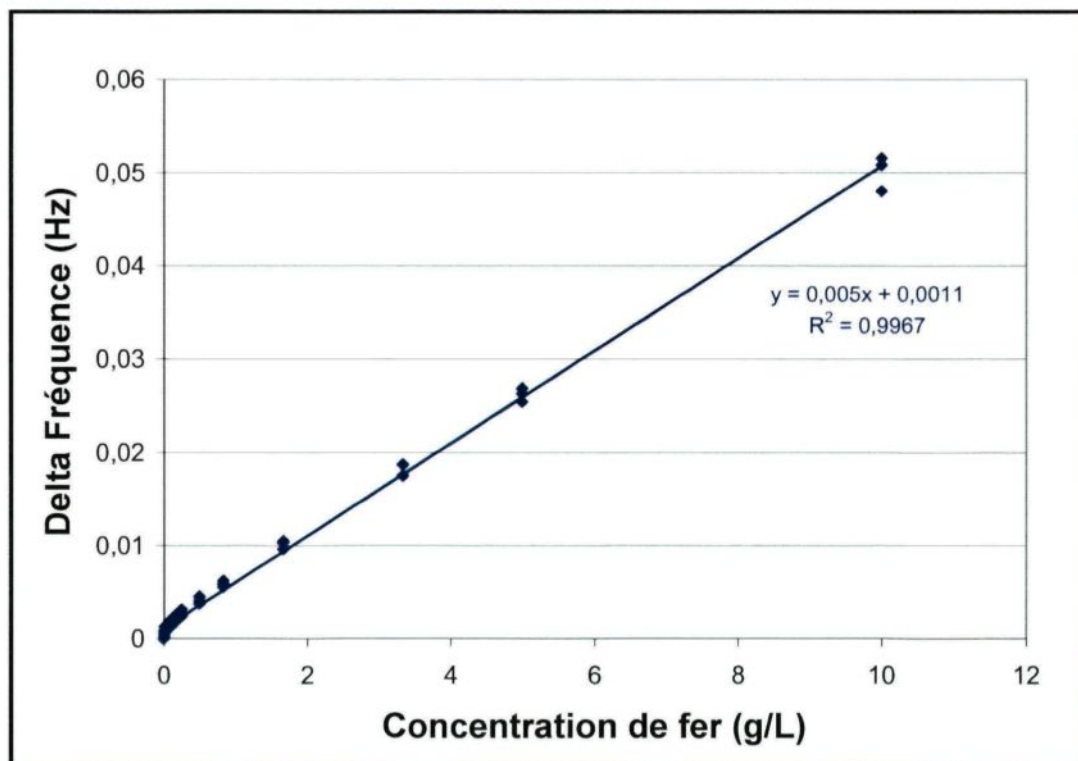
#### **5.2.4.2.2 Reproductibilité**

##### **5.2.4.2.2.1 Échantillons**

La reproductibilité des mesures doit être évaluée afin de vérifier le degré de précision obtenu. À cette fin, les mesures des échantillons statiques fer/farine ont été reproduites trois fois (Figure 5.12). En effectuant un calcul d'écart-type sur les mesures, on constate que plus il y a de fer en présence, plus les résultats sont précis. En effet, un pourcentage d'erreur d'environ 5 % est obtenu pour les mesures de 0,0500 g/L tandis qu'un pourcentage de 1,5 % et moins est obtenu pour les concentrations de 0,3000 g/L et plus. Bref, un bon degré de reproductibilité est obtenu pour des mesures avec échantillons.

#### 5.2.4.2.2.2 *Circuit de recirculation*

Les essais de recirculation d'une suspension de boue rouge à 44 % p/p ont été reproduits trois fois afin d'évaluer le degré de reproductibilité des mesures. Bien évidemment, il est plus difficile de maintenir les paramètres d'expérimentation parfaitement constants dans un circuit de recirculation. C'est pourquoi il existe une **plus** grande variabilité entre les résultats. La Figure 5.15 présente les résultats obtenus pour les trois essais. Un pourcentage d'erreur d'environ 13 % est obtenu pour une concentration de 0,1000 g/ L. Ce pourcentage diminue rapidement et est de l'ordre de quelques pourcents seulement pour des concentrations de 0,5000 g/L et plus.



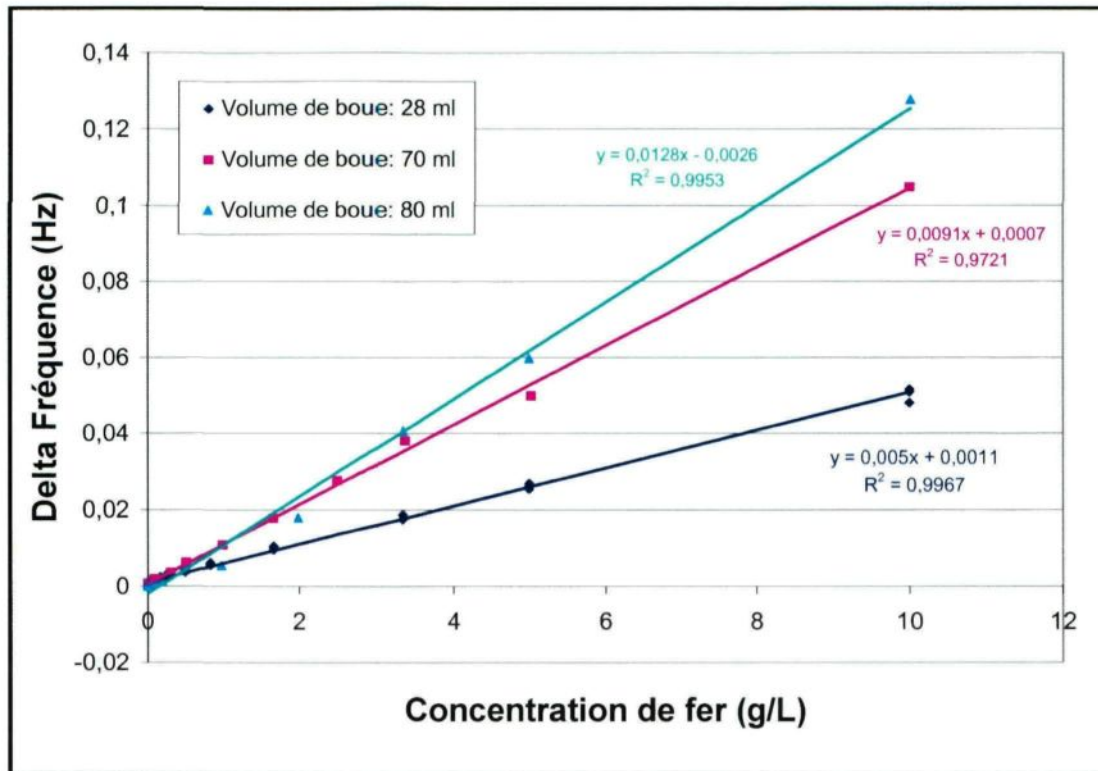
**Figure 5.15 – Reproductibilité des essais de recirculation de la boue rouge**

#### **5.2.4.2.3 Facteurs physiques influençant l'appareil de mesure**

Même si l'appareil de mesure du fer est très efficace pour mesurer de petites concentrations de fer, ce dernier est sensible à certains paramètres, tels que la quantité (volume) de boue qui se trouve à l'intérieur de la bobine, le type de matériel dans la bobine (boue, milieu aqueux, farine, etc.), le pourcentage solide (% p/p) de la boue, les débits utilisés et les vibrations importantes. L'influence des différents paramètres a été évaluée par différents essais de calibration de l'appareil de mesure du fer.

##### **5.2.4.2.3.1 Volume de boue**

Le volume de boue à l'intérieur de la bobine influence la pente de la courbe de calibration entre la mesure de la fréquence et la quantité de fer (g/L). Le volume total interne de la bobine de mesure est de 223,0 mL. Lorsqu'on effectue un essai de traçage en continu, un tuyau est inséré à l'intérieur de la bobine de mesure. Tout dépendamment des exigences associées au montage expérimental, différentes grosseurs de tuyau peuvent être utilisées. Conséquemment, le volume de boue à l'intérieur de la bobine peut varier. La Figure 5.16 présente des essais de recirculation de boue (~ 45 % p/p) avec des tuyaux de différents diamètres. Tous les autres paramètres expérimentaux sont constants à l'exception des volumes de boue rouge et des tailles des tuyaux.

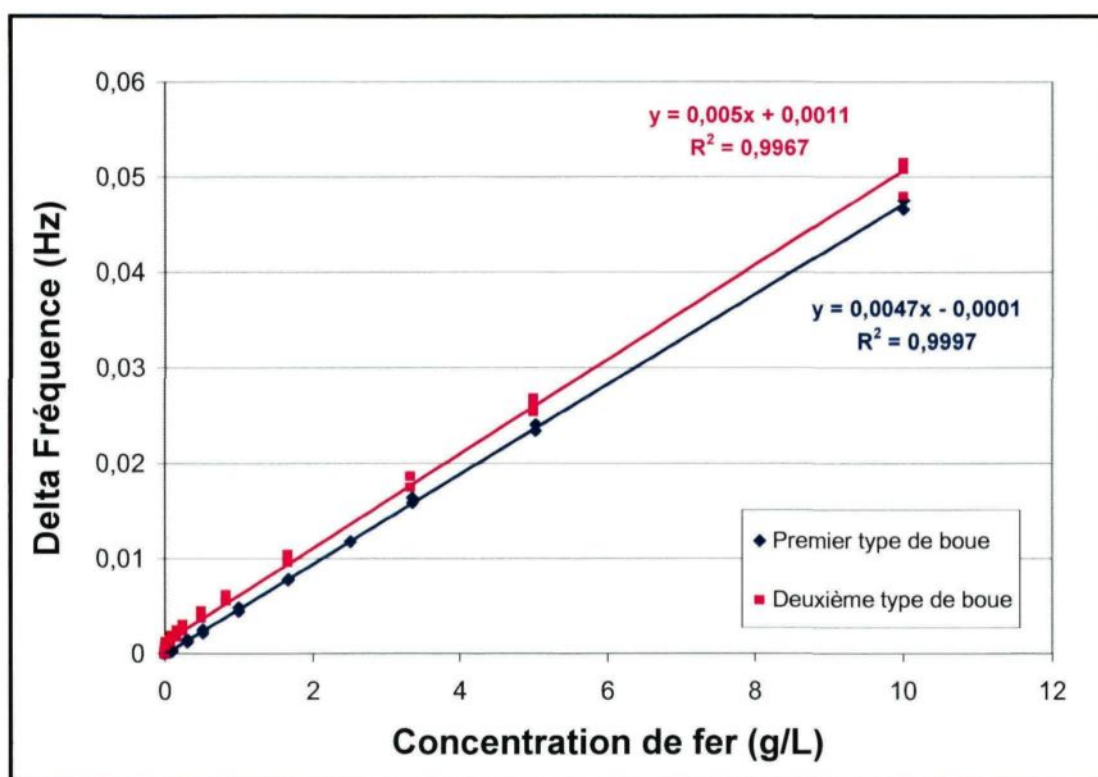


**Figure 5.16 – Influence du volume de boue rouge sur les courbes de calibration**

À concentration de fer constante et selon les Équations 5.5 et 5.12, une augmentation du volume de boue à l'intérieur de la bobine d'induction provoque une augmentation de la valeur de l'inductance « L » diminuant ainsi la fréquence de résonance dans la bobine de mesure. Conséquemment, l'écart entre la mesure de fréquence de la bobine de référence et celle de la bobine de mesure augmente avec une augmentation du volume de boue. En effet, sur la Figure 5.16, on observe une augmentation du « Delta Fréquence » lorsque le volume de boue est grand. Donc, pour chaque type de tuyauterie utilisée (pour chaque volume de boue différent), il faut recalibrer l'appareil de mesure du fer.

#### 5.2.4.2.3.2 Type de boue

Le type de boue utilisé peut également influencer l'appareil de mesure du fer. En effet, les boues rouges sont constituées d'un mélange de différentes bauxites. Donc, la valeur de perméabilité relative associée à la boue elle-même est différente pour chaque type de boue, influençant ainsi les courbes de calibration obtenues. La Figure 5.17 présente les courbes de calibration des deux types de boue utilisés au cours des expérimentations.



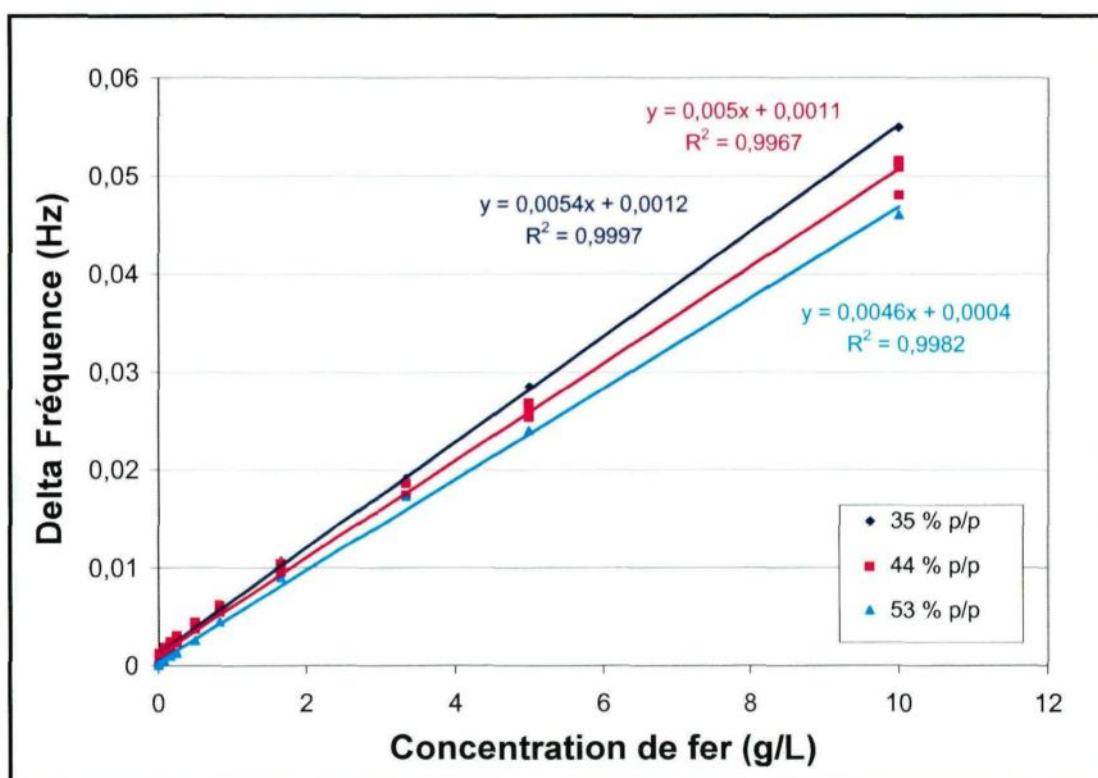
**Figure 5.17 – Courbes de calibration pour deux types de boue rouge**

#### 5.2.4.2.3.3 Concentration solide de la boue

La concentration solide de la suspension de boue (% p/p) influence également les courbes de calibration de l'appareil de mesure. En effet, la perméabilité relative associée à



une suspension de boue très liquide (boue d'alimentation 5 % p/p) est différente de celle d'une suspension de boue épaisse (sousverse 50 % p/p). Cette affirmation est valide même si c'est le même type de boue qui est utilisé pour fabriquer les suspensions. La Figure 5.18 présente les courbes de calibrations obtenues pour différentes concentrations solides. Tous les paramètres expérimentaux sont constants à l'exception de la concentration de la suspension de boue rouge. La courbe associée à une boue de 5 % p/p n'est pas présentée car les valeurs de fréquence sont beaucoup plus élevées que celles présentés dans le graphique.



**Figure 5.18 – Influence de la concentration solide sur les courbes de calibration**

Selon la Figure 5.18 et pour une même concentration de fer, les mesures de fréquence diminuent avec l'augmentation de la concentration solide de la suspension de

boue rouge. En effet, la masse de solides présents dans une suspension de boue rouge à 53 % p/p est supérieure à celle d'une suspension à 35 % p/p. Par conséquent, la valeur de la perméabilité relative d'une boue concentrée est plus élevée (Équation 5.9) diminuant ainsi l'importance de la perméabilité relative du fer (Équations 5.5 et 5.12). Notons qu'une variation de quelques % p/p, comme c'est généralement le cas à la sousverse des décanteurs, affecte peu la courbe de calibration. Conséquemment, il est possible d'utiliser une calibration pour évaluer la quantité de fer. Bien évidemment, la courbe de calibration est valide seulement pour les conditions spécifiques de la boue étudiée.

#### 5.2.4.2.3.4 Débits

La valeur du débit est très importante pour les essais de traçage. Ainsi, au cours des expérimentations, les débits à la sousverse du décanteur peuvent varier. Conséquemment, il est important de vérifier l'impact de la variation des débits sur les courbes de calibration. Pour ce faire, des variations de débits de l'ordre de 350 à 3500 mL/min ont été effectuées durant les mesures en continu du signal de base « blanc » des suspensions de boue rouge de différentes concentrations. Les résultats obtenus démontrent qu'il y a peu de variation de la mesure de fréquence entre les différents débits. En fait, on observe principalement un pic au moment où le débit est changé. Ces pics indiquent que le changement de débit provoque une secousse dans le tuyau et dans la bobine de mesure. Par conséquent, la bobine de mesure est très peu sensible aux variations de débit si le tuyau qui la traverse est fixé solidement à l'entrée et à la sortie de la cage de Faraday pour minimiser l'impact des secousses.



#### 5.2.4.2.3.5 Vibrations

Il a été observé, au cours des essais de variations de débit, que la bobine de mesure est sensible aux secousses ou vibrations. Différents essais exploratoires ont été réalisés afin de déterminer l'influence de la vibration sur les mesures de fréquence. Il a été observé que l'ouverture de la cage de Faraday ou encore des coups donnés à celle-ci sont détectés par l'appareil de mesure du fer. Dans le même ordre d'idée, les pulses importants produits par des variations brusques de débits dans les tuyaux ont le même effet. En fait, les vibrations importantes sont transmises aux bobines d'induction ce qui cause une perturbation de leur champ magnétique et par conséquent de la valeur de la mesure effectuée. Néanmoins, il est possible de minimiser ces vibrations en fixant solidement l'appareil de mesure ainsi que les tuyaux.

### **5.3 Montage expérimental**

Le montage expérimental est principalement composé d'un décanteur à échelle réduite, de réservoirs de liqueur Bayer et de boue rouge, de pompes et tuyaux de canalisations, etc. L'ensemble des éléments constituant le montage expérimental sont installés sur une plateforme expérimentale amovible à l'intérieur du laboratoire du GRUSSL de l'Université du Québec à Chicoutimi (Figure 5.19).

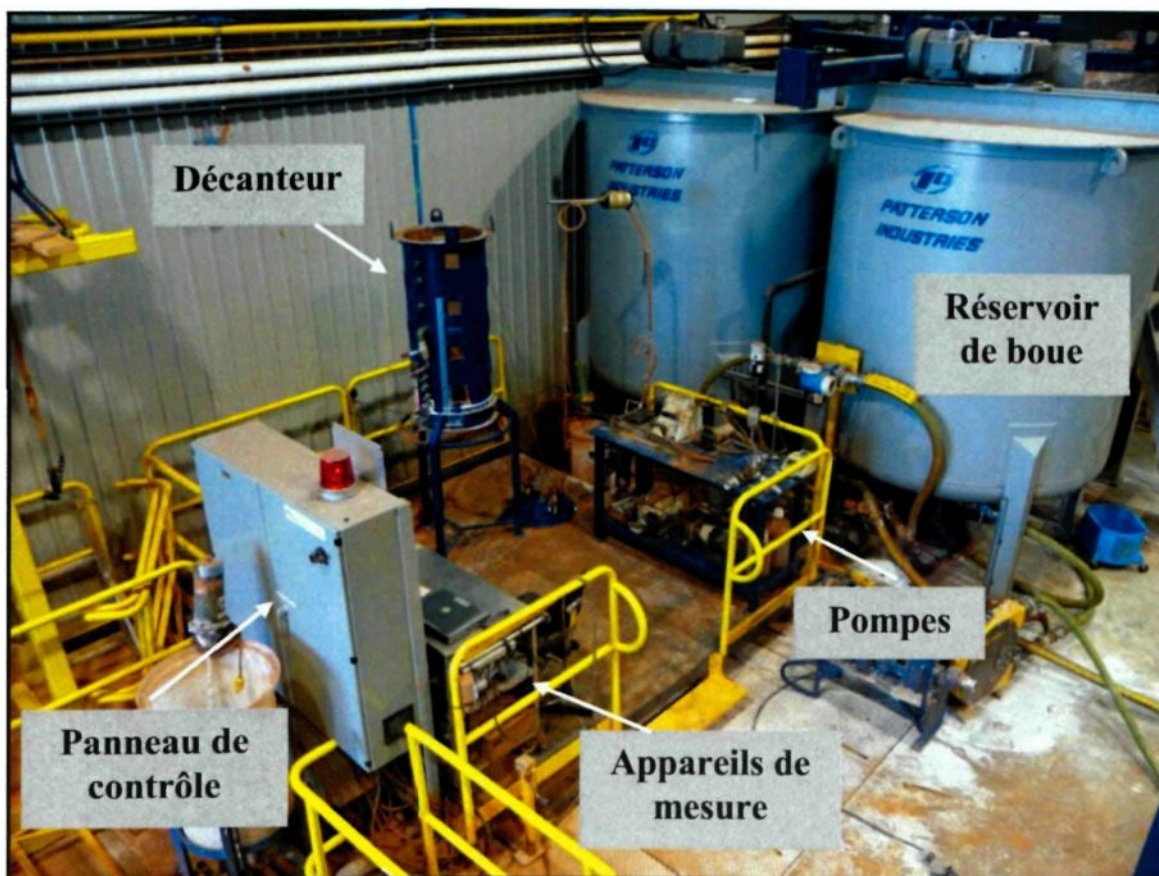


Figure 5.19 – Plateforme du montage expérimental

### 5.3.1 *Décanteur à échelle réduite*

Un décanteur à échelle réduite a été construit afin de réaliser des essais de traçage sur le comportement de décantation de la boue rouge. Le décanteur utilisé au cours des expérimentations est construit de façon à reproduire en continu le comportement de décantation de certains décanteurs industriels. De plus, le décanteur à échelle réduite a été conçu afin d'être adapté et/ou modifié pour simuler certains déplacements problématiques de la boue (chemins préférentiels « rat hole », zone morte, entartrage des lames, etc.). Il

existe plusieurs avantages à l'utilisation d'un montage expérimental à échelle réduite. En effet, les quantités de matières premières (liqueur Bayer, bauxite, flocculant) utilisées sont moins importantes. De plus, la durée d'expérimentation, c'est-à-dire le temps nécessaire pour procéder à un essai de séparation solide/liquide (remplissage et atteinte d'un état d'équilibre), y est moins longue. Par ailleurs, les quantités de fer nécessaires pour une expérimentation sont moins importantes dans un petit décanteur. Conséquemment, l'utilisation d'un décanteur à échelle réduite permet de gagner du temps au cours d'un essai et permet de diminuer les coûts associés aux essais expérimentaux.

Le décanteur à échelle réduite utilisé consiste en un réservoir cylindrique dont la base est terminée par une section conique. Il comporte un puits d'alimentation, une sousverse ainsi qu'un râteau pouvant être modifié selon les paramètres spécifiques de l'expérimentation. Le réservoir a une capacité maximale de 226,0 L (~ 1,25 m de hauteur par 0,50 m de largeur avec un angle de 30 ° dans la section conique). Mentionnons également la présence de 14 fenêtres, disposées à intervalles réguliers le long du réservoir, pour faciliter l'observation du processus de décantation. Plusieurs soupapes ont été installées sur la base conique du décanteur afin de permettre un échantillonnage du lit de boue (évaluation de la concentration solide et vérification de la présence résiduelle de traceur). Des soupapes supplémentaires ont également été positionnées à différentes hauteurs le long de la paroi du décanteur afin de recueillir la surverse au cours des expérimentations. Le râteau se situe dans la section conique du décanteur. Un panneau de contrôle, relié au moteur du râteau, permet de faire varier la vitesse de rotation entre 0,26 -

1,30 rpm. Une rampe d'accès a également été ajoutée afin de permettre l'accès à l'intérieur du décanteur. La Figure 5.20 présente une image du décanteur à échelle réduite.



**Figure 5.20 – Décanteur à échelle réduite**

### **5.3.2 *Le râteau***

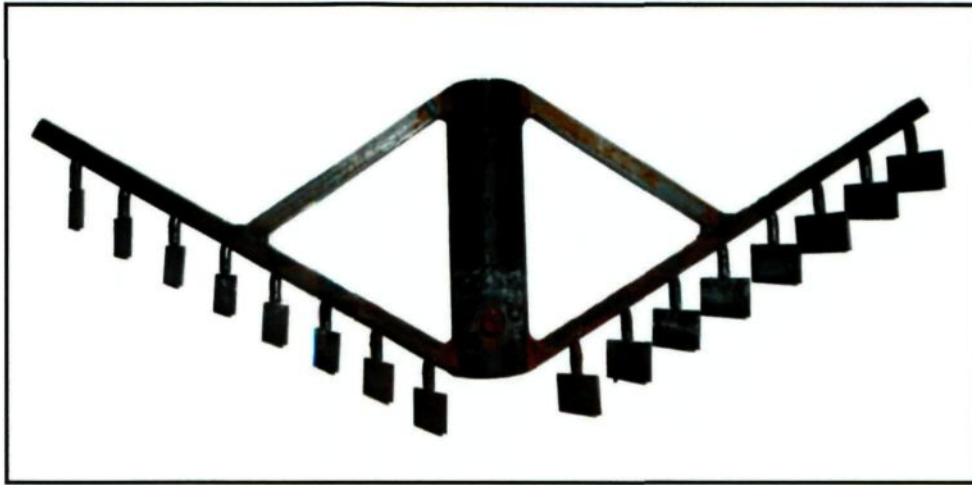
#### **5.3.2.1 *Géométrie***

Le râteau est utilisé afin d'appliquer un cisaillement sur la boue rouge pour aider à la compaction (évacuation de la liqueur) et au déplacement de la boue vers la sousverse. La conception d'un râteau s'avère être une étape assez complexe de l'élaboration du montage

expérimental. En effet, elle nécessite la prise en compte de plusieurs paramètres reliés à la géométrie et à l'opération du décanteur. Les paramètres géométriques sont le nombre de lames, la répartition des lames sur le bras, leur forme, leur rapport hauteur/longueur et leur angle d'attaque. Les paramètres d'opération du décanteur à considérer sont : la vitesse de rotation du râteau, les débits d'alimentation et de sousverse, la concentration en solide à l'alimentation et à la sousverse ainsi que la hauteur du lit de boue. Bien évidemment, la conception optimale d'un râteau en tenant compte de l'ensemble des paramètres est très difficile. C'est pourquoi, la méthode de conception traditionnelle est utilisée. Cette méthode est une approche plus simplifiée et ne tient compte que de quelques-uns des paramètres (Annexe B).

Le râteau utilisé est constitué de deux bras d'une longueur de 25,00 cm orientés à 30 °. Le râteau possède un total de 16 lames de 2,00 cm de haut par 3,00 cm de large et d'une épaisseur de 0,15 cm. Chaque bras possède 8 lames disposées à intervalles réguliers dans une géométrie complémentaire. La Figure 5.21 présente le râteau utilisé pour les expérimentations. Une description sommaire des calculs de conception du râteau utilisé est présentée à l'Annexe B.





**Figure 5.21 – Râteau du décanteur à échelle réduite**

#### **5.3.2.2 *Couplemètre***

La mesure du couple permet d'évaluer l'efficacité du râteau. Par définition, le couple représente une force appliquée perpendiculairement au bras d'un système en rotation. Dans le cas d'un râteau, le couple est causé par deux phénomènes : la friction due au cisaillement de la boue sur les structures et la force d'impact due au mouvement de la boue<sup>(64)</sup>. Dans le premier cas, la viscosité dynamique de la boue et la vitesse de cisaillement près des surfaces contrôlent le couple de cisaillement. Dans le second cas, la densité de la boue et la vitesse des corps rigides contrôlent le couple de compression. Il est possible de calculer le couple du râteau à l'aide d'équations<sup>(57)(64)</sup>. Dans le cas du présent projet, un couplemètre a été installé sur le râteau du décanteur afin d'évaluer en continu l'évolution de la viscosité du lit de boue. Autrement dit, la valeur du couple est seulement utilisée pour s'assurer de la stabilité du lit de boue.

## 5.4 Protocole expérimental

Les travaux expérimentaux sont effectués dans le laboratoire pilote du Groupe de Recherche Universitaire en Séparation Solide/Liquide (GRUSSL), qui possède toutes les installations nécessaires à la réalisation de ce projet (réservoirs de liqueur Bayer et de boue rouge, pompes, canalisation, etc.). De façon générale, le protocole expérimental de chaque essai est similaire et consiste à sélectionner les paramètres d'expérimentation (débit de boue, de liqueur et de floculant, vitesse de rotation du râteau, etc.), à remplir le décanteur de liqueur Bayer et à préparer la solution de polymère. Ensuite, la suspension de boue rouge est mélangée à la solution de polymère et introduite dans le décanteur jusqu'à l'obtention du niveau de boue désiré. L'appareil de mesure du fer est mis en fonction lorsque le décanteur atteint un état d'équilibre (stabilité des mesures du couple) afin de mesurer le signal de base de la boue rouge (valeur zéro de l'expérimentation). Le traceur de fer est par la suite injecté soit dans la conduite d'alimentation ou encore est déposé directement sur le lit de boue. Le temps d'expérimentation doit être suffisamment long (1 à 2 temps de résidence) afin de permettre le passage du traceur de fer. La Figure 5.22 présente un schéma du montage expérimental lors d'un essai expérimental.

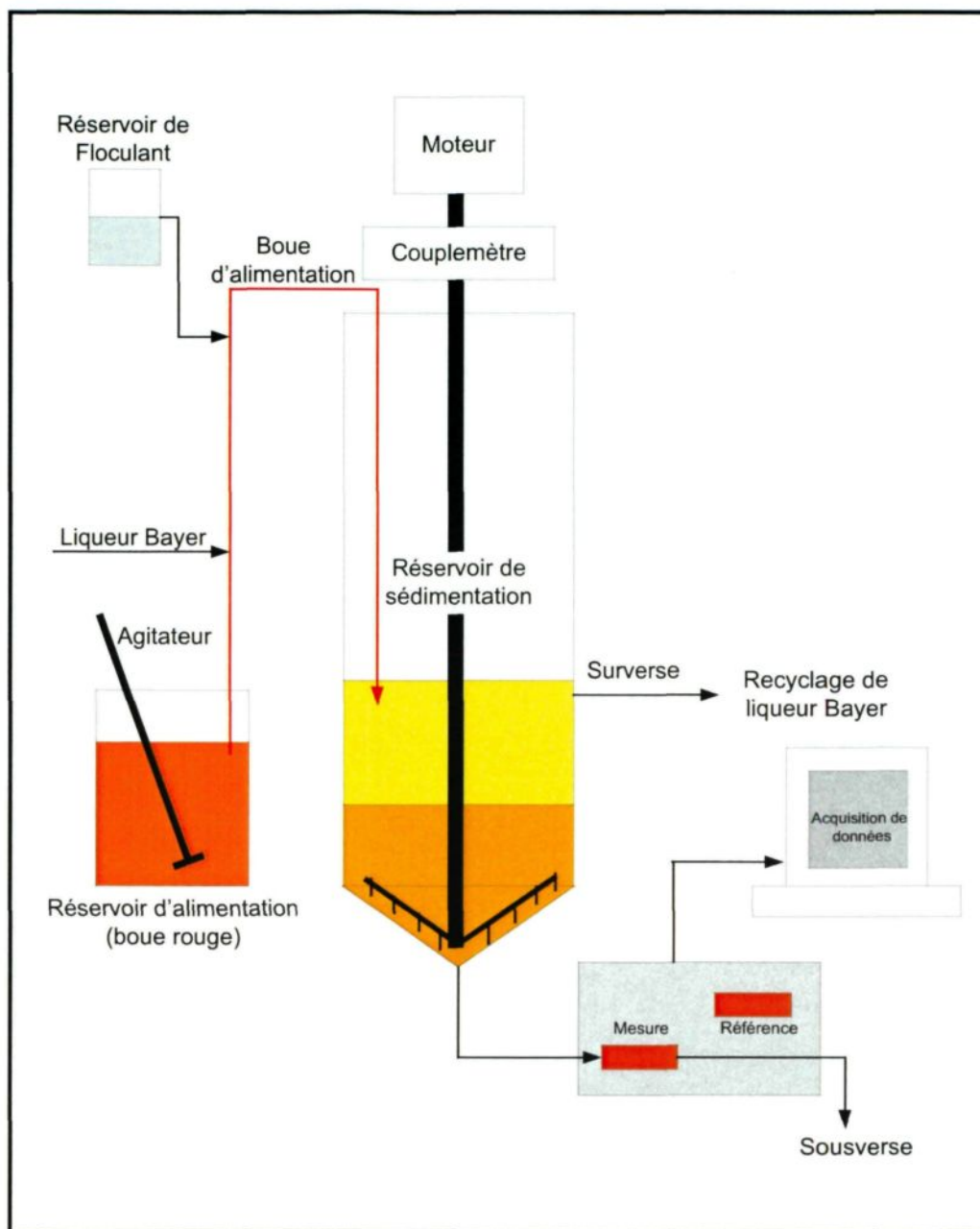


Figure 5.22 – Schéma d'un montage expérimental lors d'un essai



## 5.5 Variables

Le décanteur à échelle réduite est utilisé pour générer un système de séparation solide/liquide continu à l'intérieur duquel un essai de traçage est effectué. La présente section porte sur la liste des principales variables pouvant affecter le processus de séparation solide/liquide ainsi que l'essai de traçage.

### 5.5.1 *Quantité de traceur injecté*

La quantité de traceur à injecter au cours d'un essai de traçage est l'un des points les plus importants à déterminer<sup>(101)</sup>. La limite de détection de la poudre de fer a préalablement été évaluée. Pour chaque essai de traçage, la quantité de poudre de fer injectée est évaluée en considérant la limite de détection de l'appareil de mesure du fer et la quantité de boue présente dans le décanteur. La quantité de fer est pesée sur une balance de précision au dixième de milligramme.

### 5.5.2 *Modes d'injection du traceur de fer*

Un des inconvénients à utiliser un traceur de poudre est que celui-ci a tendance à coller ou s'agglomérer sur les surfaces de contact<sup>(72)</sup>. Afin de palier à ce problème, le traceur de poudre de fer est mélangé à la suspension de boue ou à de la liqueur Bayer avant d'être injecté. La poudre de fer peut être injectée de différentes façons en fonction du type d'information recherchée. Ainsi, pour obtenir la trace générale du décanteur, la poudre de fer est mélangée à la boue d'alimentation. Dans ce cas, le traceur est préalablement

mélangé à une quantité donnée de liqueur et est introduit dans la ligne d'alimentation via une pompe péristaltique (Figure 5.23). Une distance de mélange (longueur de tuyau) est nécessaire pour s'assurer que le traceur de fer est dispersé efficacement à travers la suspension de boue<sup>(101)</sup>. Il est également possible d'obtenir des informations sur une zone spécifique du décanteur. En effet, la RTD d'une zone spécifique est obtenue lorsque la poudre de fer est déposée à un endroit précis du lit de boue. La méthodologie utilisée consiste à mélanger la poudre de fer avec de la boue de sousverse puis, à déposer ce mélange directement sur le lit de boue à l'endroit désiré. L'injection s'effectue à l'aide d'une perche spéciale terminée par une seringue.



**Figure 5.23 – Système d'injection du traceur de fer dans la ligne d'alimentation**

### 5.5.3 Types d'injection du traceur de fer

Plusieurs types d'injection ont été effectués afin de caractériser les différents écoulements et déplacements de boue dans le décanteur. En effet, le traceur peut être injecté en un seul point (injection localisée), en une section circulaire (injection circulaire) et de façon uniforme (dispersion uniforme). Trois zones d'injection ont été retenues afin de diminuer le nombre d'essais : près de la paroi (injection à  $r$ ), entre la paroi et le centre (injection à  $r/2$ ) et près du centre du décanteur (injection à  $r = 0$ ). La Figure 5.24 présente un schéma de l'emplacement des zones d'injection.

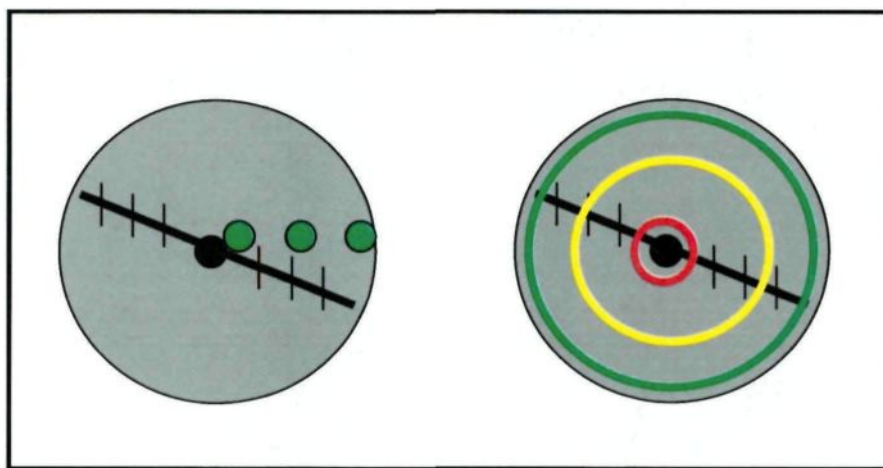


Figure 5.24 – Emplacement des zones pour des injections localisées et circulaires

### 5.5.4 Forme et emplacement du puits d'alimentation

Deux puits d'alimentation ont été utilisés au cours des expérimentations. Le premier est similaire à ceux retrouvés en industrie et consiste à introduire la boue d'alimentation et le floculant tangentiellement dans un cylindre circulaire creux (Figure 5.25). Les dimensions du puits sont de 7,5 cm de diamètre par 20,0 cm de long. La fonction principale

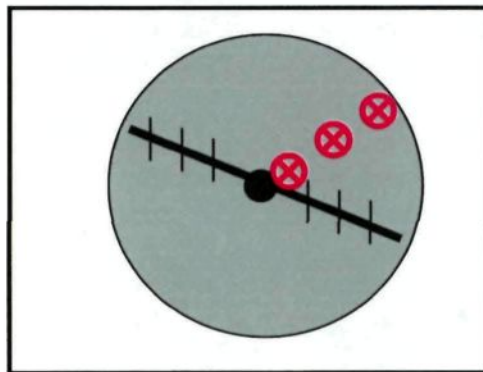
du puits est de ralentir la vitesse de sédimentation des agrégats. Pour un débit d'alimentation de 5,0 L/min, la vitesse de sortie du puits est de 1,1 m/min. Le second puits utilisé est constitué d'un système de tuyauterie à l'intérieur duquel la boue et le floculant sont mélangés. Bien évidemment, la vitesse de sortie des agrégats dans ce type de puits est très supérieure à celle du premier. Conséquemment, les agrégats formés et la distribution de ceux-ci à la surface du lit de boue sont très différents selon le puits utilisé. Mentionnons que dans les deux cas, le floculant est introduit perpendiculairement à l'écoulement et en deux endroits sur la ligne d'alimentation (Masterflex L/S 25 « Tygon LFL C-06429 » de 4,8 mm de diamètre). De plus, l'ajout du floculant s'effectue en utilisant une pompe péristaltique numérique de grande précision (Masterflex L/S Digital Economy Drive).



**Figure 5.25 – Puits d'alimentation**



L'emplacement du puits d'alimentation peut également influencer la structure du lit de boue et la RTD résultante. Ainsi, les puits d'alimentation peuvent être situés en 3 emplacements : alimentation près de la paroi ( $r$ ), alimentation à mi-chemin entre la paroi et le centre ( $r/2$ ) et alimentation près du centre ( $r = 0$ ). Chacun de ces emplacements peut être étudié dans deux sections du décanteur (mêmes points d'alimentation mais à  $180^\circ$  pour un total de 6 points d'alimentation différents). La hauteur du puits d'alimentation peut également être variée pour observer si elle influence la RTD. La Figure 5.26 présente les emplacements possibles des puits d'alimentation.



**Figure 5.26 – Emplacements possibles des puits d'alimentation**

### 5.5.5 Râteau

Le râteau est un élément important dans le processus de séparation solide/liquide. Sa vitesse de rotation ainsi que sa structure influencent l'efficacité des décanteurs<sup>(1)</sup>. Trois différentes vitesses de rotation ont été évaluées : 7,2, 15,0 et 28,6 rotations/heure.

### **5.5.6 Conditions d'opérations**

#### **5.5.6.1 Hauteur du lit de boue**

Les différentes conditions d'opération du décanteur à échelle réduite peuvent également influencer la structure du lit de boue. Entre autre, la hauteur du niveau de boue dans le décanteur a une influence sur le temps de résidence du décanteur. Ainsi, trois hauteurs différentes ont été évaluées. La mesure (cm) de la hauteur du lit de boue s'effectue à l'aide des fenêtres sur le pourtour du décanteur.

#### **5.5.6.2 Débits**

Les débits d'alimentation et de sousverse influencent également le temps de résidence. Ainsi, ces deux débits peuvent être variés de façon indépendante afin d'en observer l'impact sur la RTD. Le nombre de variations effectuées n'est pas prédéterminé mais dépend de la facilité à maintenir stable le processus de séparation solide/liquide sous des débits différents.

#### **5.5.6.3 La floculation**

Le processus de floculation (formation d'agrégats) peut également influencer la structure du lit de boue (les agrégats forment le lit de boue). En effet, les conditions (niveau d'agitation, type de flocculant, dosage, etc.) sous lesquelles les agrégats sont formés influencent leurs dimensions ainsi que leurs densités. En industrie, la variation de dosage est une technique couramment employée pour maintenir stable le processus de séparation

solide/liquide. Conséquemment, trois différents dosages ont été expérimentés afin d'en évaluer l'effet sur la RTD.

#### **5.5.6.3.1     *Type de flocculant***

Il existe une grande variété de polymères synthétiques sur le marché. Ceux utilisés dans l'industrie du traitement de la bauxite sont principalement des copolymères d'acrylamide et d'acrylate de sodium modérément anioniques. Ces polymères ont démontré une grande efficacité pour flocculer une suspension de boue rouge et de liqueur Bayer. Dans le cadre des essais expérimentaux, un seul type de flocculant a été utilisé. La méthode de préparation est rigoureuse afin d'assurer la stabilité de la solution et inclut les deux étapes suivantes : la dispersion du polymère dans la solution (agitation adéquate) et un temps de repos de 36 heures (stabilité des solutions).

#### **5.5.6.3.2     *Concentration de la solution de flocculant***

La concentration de la solution de polymère s'exprime en % p/p (poids du polymère actif / poids de la solution). De façon générale, une solution concentrée est plus difficile à disperser (solution plus visqueuse) tandis qu'une solution trop diluée peut provoquer une dilution de la suspension (diminution de la concentration solide de la suspension) à l'étude. Le choix de la concentration de la solution utilisée a été déterminé à partir d'essais exploratoires permettant d'obtenir la meilleure floculation (0,03 % p/p). Un viscosimètre est utilisé pour mesurer la viscosité de la solution de flocculant.

### 5.5.6.3.3 *Dosage*

Le dosage représente la quantité de polymère actif nécessaire pour flocculer une tonne métrique de matières sèches. Il est exprimé en gramme par tonne et les quantités utilisées sont variables. Les dosages utilisés sont estimés à partir d'essais préalables utilisant la méthodologie du test du cylindre. Ainsi, le volume nécessaire de polymère requis pour une floculation efficace est déterminé et le dosage correspondant est calculé. Le dosage est une variable importante pour l'industrie car elle influence les coûts de production associés au type de flocculant. L'Équation 5.13 permet d'estimer le dosage nécessaire pour flocculer une quantité donnée d'une suspension de boue rouge.

$$Dosage = \frac{(vol. flocculant) * \left[ \frac{(concentration flocculant)}{100} \right]}{(vol. suspension) * (concentration solide suspension)} * 10^6 \quad (\text{Équation 5.13})$$

Le volume de flocculant est en mL, la concentration du flocculant s'exprime g/100 mL de solution, le volume de la suspension est en litre (L), la concentration solide de la suspension s'exprime en g/L et le facteur de  $10^6$  est en g/tonne métrique.

### 5.5.7 *Simulation de problèmes*

Un des objectifs de ce projet consiste à diagnostiquer certains problèmes couramment rencontrés dans les décanteurs industriels. Ainsi, différentes modifications sont effectuées sur le montage expérimental afin de simuler les problèmes suivant : l'entartrage partiel des lames (augmentation de l'épaisseur de chaque lame du râteau), l'obstruction du râteau (obstruction complète des lames du râteau), la création de zones



mortes ainsi que la création de chemins préférentiels (au centre). Une description plus détaillée de la simulation des problèmes est présentée avec les résultats dans le Chapitre 6.

## **5.6 Paramètres expérimentaux**

### ***5.6.1 Concentration de la liqueur Bayer***

En industrie, la concentration en caustique de la liqueur varie de 10 g/L (condition dans les circuits de lavage) à 230 g/L (décanteur à hauts rendements, DHR). Cependant, des conditions spécifiques de température sont nécessaires pour travailler à une concentration élevée (230 g/L). Étant donné qu'il est impossible de reproduire ces conditions dans les laboratoires de l'Université du Québec à Chicoutimi, la concentration visée pour les essais est de 30 g/L de caustique (NaOH) et de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). La liqueur Bayer est contenue dans un réservoir d'une capacité de 12 000 L. La liqueur provenant de la surverse est récupérée après chaque expérimentation et retournée dans le réservoir.

### ***5.6.2 Concentration de la suspension de boues rouges***

La boue rouge est le résidu produit lors de l'extraction de l'alumine à partir de la bauxite. La composition typique des boues rouges varie en fonction de la source et de la nature de la bauxite elle-même. C'est pourquoi, il est important de conserver le même type de boue tout au long des travaux expérimentaux. La boue rouge est conservée dans un homogénéisateur d'une capacité de 8000 L. Étant donné la quantité de boue nécessaire à chaque expérimentation, deux types de boue ont été utilisés. La concentration de la

suspension est fixée à 50,0 g/L. Ainsi, au cours de chaque expérimentation, la boue rouge est mélangée avec la liqueur Bayer dans des proportions variées afin d'atteindre la concentration désirée.

Mentionnons également que la boue utilisée pour les essais de floculation a été antérieurement floculée et décantée. Puisque la boue a déjà subi une ou plusieurs floculations, elle contient une concentration inconnue de polymères. Cette concentration inconnue est souvent qualifiée de « mémoire » de la boue. Cette quantité résiduelle de polymère conduit à une réduction du dosage nécessaire pour floculer les matières particulières en suspension lorsque l'on compare au dosage nécessaire pour floculer une suspension de boues rouges n'ayant jamais été floculée.

## **5.7 Mesures**

Au cours d'une expérimentation, plusieurs mesures sont effectuées pour s'assurer de la stabilité du processus de séparation solide/liquide. Une méthode expérimentale a été mise au point pour évaluer la variabilité des différents paramètres du processus de séparation.

### **5.7.1 Débits**

Plusieurs débits sont mesurés au cours d'une expérimentation : le débit de liqueur Bayer, le débit de suspension de boue rouge, le débit d'alimentation, le débit de flocculant et le débit de sousverse. Le débit de liqueur, de suspension et de flocculant sont mesurés avant l'essai pour s'assurer que les pompes délivrent bien la quantité désirée. Le débit d'alimentation est le débit de suspension dilué qui entre dans le décanteur. Ce débit est mesuré plusieurs fois au début de l'expérimentation pour s'assurer de sa valeur exacte, puis toutes les 30 min en effectuant une déviation de l'alimentation.

Les débits de sousverse sont très importants dans la réalisation d'un essai de traçage. Étant donné la quantité de mesures à effectuer et la longueur des essais, le débit est mesuré toutes les 30 min. Notons cependant que, lorsque le système atteint un état d'équilibre, le débit à la sousverse est constant (peu de variation). De plus, toutes les variations de la fréquence de la pompe de sousverse sont notées au cours de l'essai. Ainsi, une courbe de calibration entre la fréquence de la pompe de sousverse et le débit peut également être utilisée. Spécifions que les courbes de calibration obtenues vont varier en fonction du type de boue utilisé et de la concentration solide. La Figure 5.27 présente un exemple des courbes de calibration obtenue.

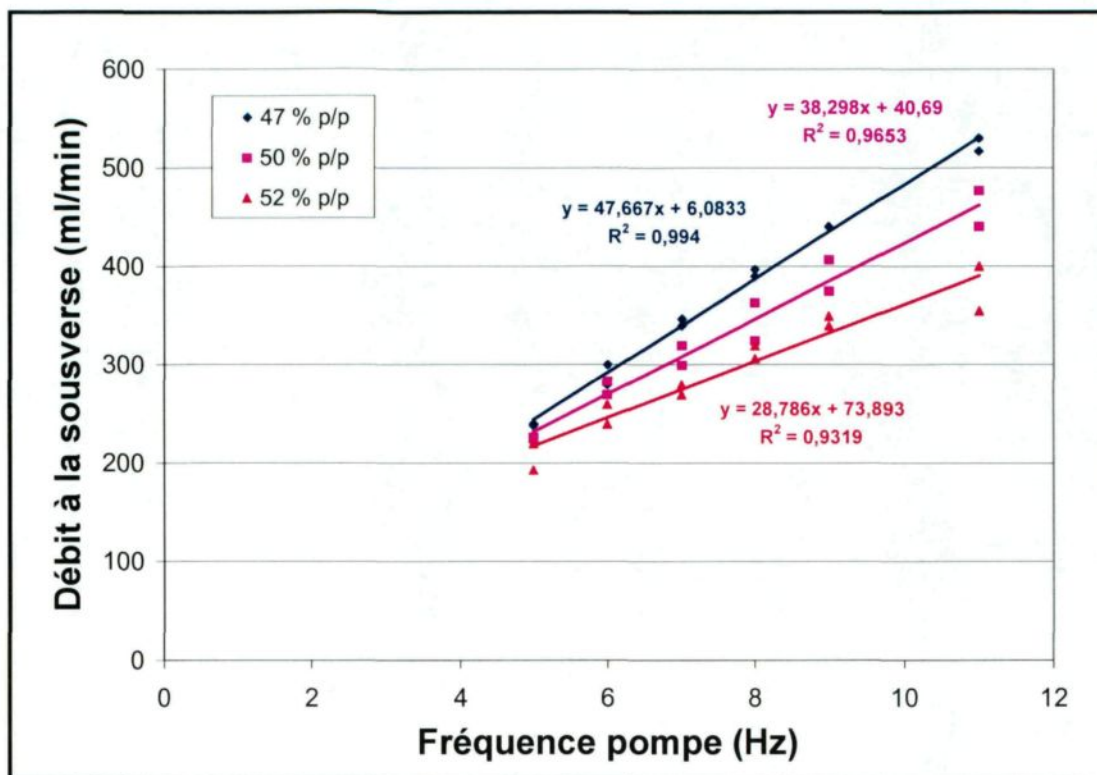


Figure 5.27 – Courbes de calibration de la pompe de sousverse

### 5.7.2 Concentration solide de l'alimentation

La concentration solide de l'alimentation ainsi que sa densité ( $\text{kg/m}^3$ ) sont mesurées toutes les 30 min. Pour ce faire, l'alimentation est déviée et recueillie dans un cylindre graduée puis filtrée, séchée et pesée. La concentration solide de l'alimentation est exprimée en g/L (g de solide sec / L de boue). La densité est obtenue à l'aide d'un densimètre.

### **5.7.3 Concentration solide de la boue de sousverse**

La pompe de sousverse du décanteur expérimental est actionnée lorsque le niveau de boue atteint la hauteur désirée. La concentration solide de la boue de sousverse est alors mesurée toutes les 30 min. Ainsi, deux échantillons sont prélevés et pesés sur une balance chauffante (Mettler Toledo HB43 Halogen) et la concentration est exprimée en % poids/poids (poids du solide sec / poids de l'échantillon).

### **5.7.4 Vitesse de sédimentation**

La vitesse de sédimentation des particules floculées est l'un des paramètres caractérisant la performance de la floculation. Elle est mesurée toutes les 30 min à l'aide de la méthode du test du cylindre. Pour se faire, l'alimentation est déviée dans un cylindre gradué et le temps de passage de la ligne de boue entre les graduations d'un cylindre est mesuré. La mesure est effectuée cinq fois et la moyenne est calculée. Les valeurs ciblées pour la plupart des essais se situent en 15,0 et 20,0 m/h.

## **CHAPITRE 6**

### **RÉSULTATS ET DISCUSSION**

L'un des objectifs du présent projet de recherche consiste à effectuer des essais de traçage dans un processus de séparation solide/liquide d'un décanteur expérimental, en contrôlant les principales variables, afin d'obtenir des signatures de comportement typique du déplacement de la boue. Pour ce faire, les essais expérimentaux doivent être précis et reproductibles afin d'associer les signatures obtenues aux comportements particuliers de déplacement de la boue. Le présent chapitre présente donc les essais expérimentaux effectués à l'aide d'un décanteur expérimental à échelle réduite : reproductibilité des essais de traçage, variation des conditions d'opération (vitesse du râteau, emplacement du puits d'alimentation, niveau de boue, etc.) et simulation de problématiques (zones mortes, chemin préférentiel, obstruction des lames, etc.). Une méthode d'analyse a également été développée afin de faciliter l'étude des signatures obtenues. Cette méthode est basée sur une combinaison du modèle des réservoirs en série et du principe de déconvolution des courbes spectrales. Le développement de la méthode et la manière de l'utiliser sont également présentés.

## 6.1 Présentation des résultats

### 6.1.1 *Traitement préliminaire*

Les données brutes obtenues lors des essais expérimentaux sont les différences entre les fréquences de résonance (Hz) de la bobine de référence et de la bobine de mesure en fonction du temps (s). Ces données doivent être traitées avant d'obtenir la courbe de RTD. Un traitement préliminaire est donc utilisé afin de faciliter l'analyse des courbes de RTD. Ce traitement est systématiquement appliqué à toutes les courbes.

#### 6.1.1.1 *Recalage*

La première étape du traitement consiste à éliminer le décalage éventuel de la ligne de base. En soustrayant la fréquence de la bobine de mesure de la bobine de référence, on obtient ainsi un « Delta Fréquence » presque nul. Cette différence de fréquence est due à la ligne de base de la boue rouge et peut être légèrement différente d'un essai à l'autre. C'est pourquoi, à chaque essai, la valeur moyenne associée à la ligne de base est soustraite du Delta Fréquence. D'autre part, il peut y avoir une dérive progressive de la ligne de base, due à une variation du bruit de fond ou parce que des particules de fer adhèrent à la paroi du tuyau à l'intérieur de la bobine de mesure. Dans ce cas, il est nécessaire d'effectuer un changement de repère afin de repositionner correctement la courbe. La Figure 6.1 présente un exemple de courbes de « Delta Fréquence » obtenues avant et après le recalage de la ligne de base.

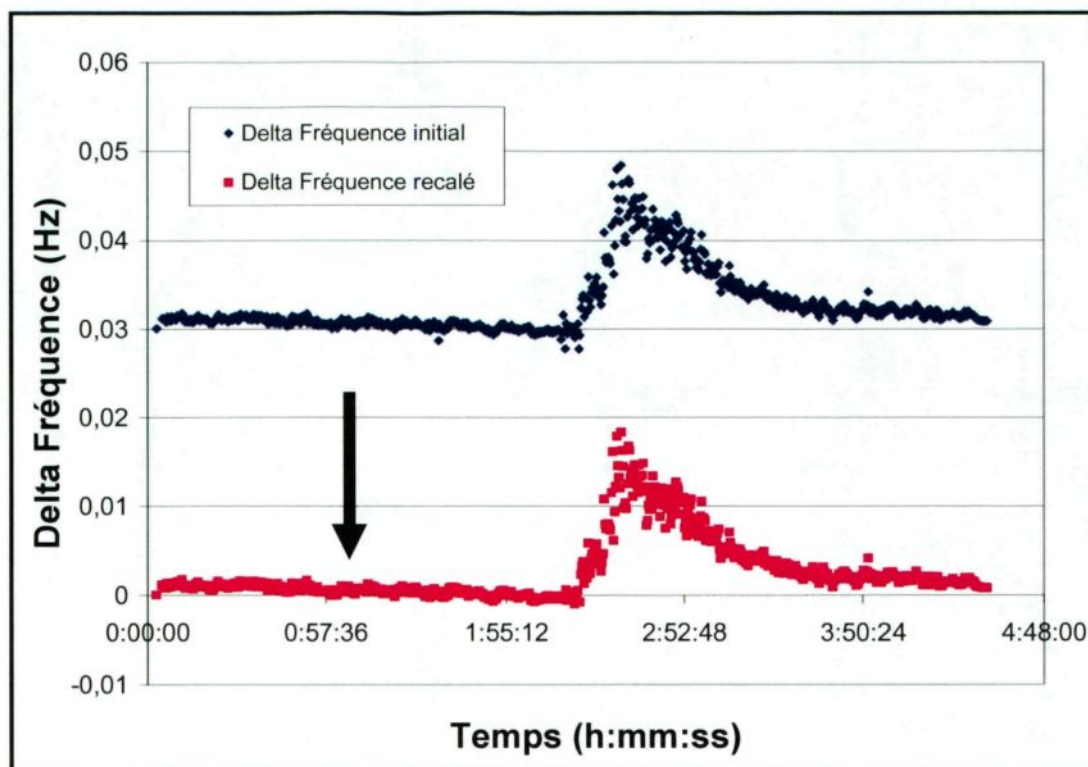
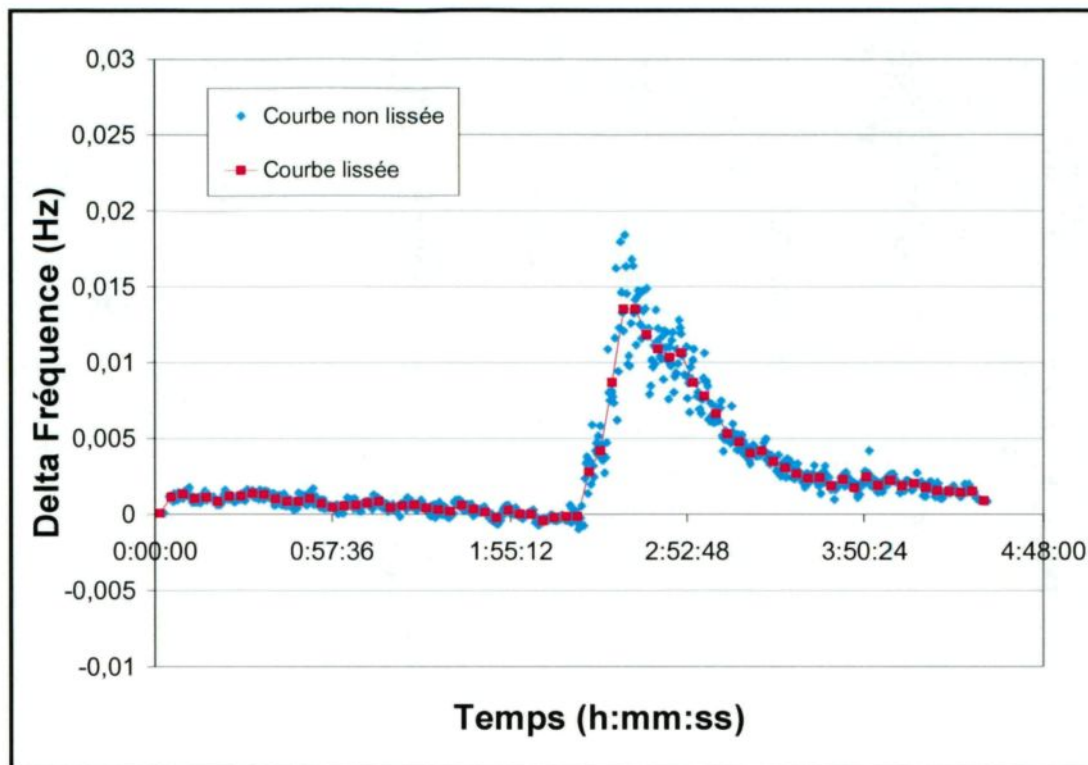


Figure 6.1 – Recalage de la courbe Delta Fréquence

#### 6.1.1.2 Lissage des courbes de RTD

Afin d'améliorer le rapport signal/bruit, il est préférable de lisser les courbes Delta Fréquence. Cette étape permet d'observer certaines caractéristiques qui peuvent être dissimulées dans le bruit, comme par exemple de petits pics, la trainée, etc. Il existe de nombreuses méthodes de lissage. Celle utilisée dans le présent projet consiste à moyenner les mesures de fréquence à toutes les 11 mesures. Cette méthode de lissage est particulièrement efficace lorsque le temps d'échantillonnage est très court par rapport au temps de résidence. La Figure 6.2 présente une courbe avant et après lissage.

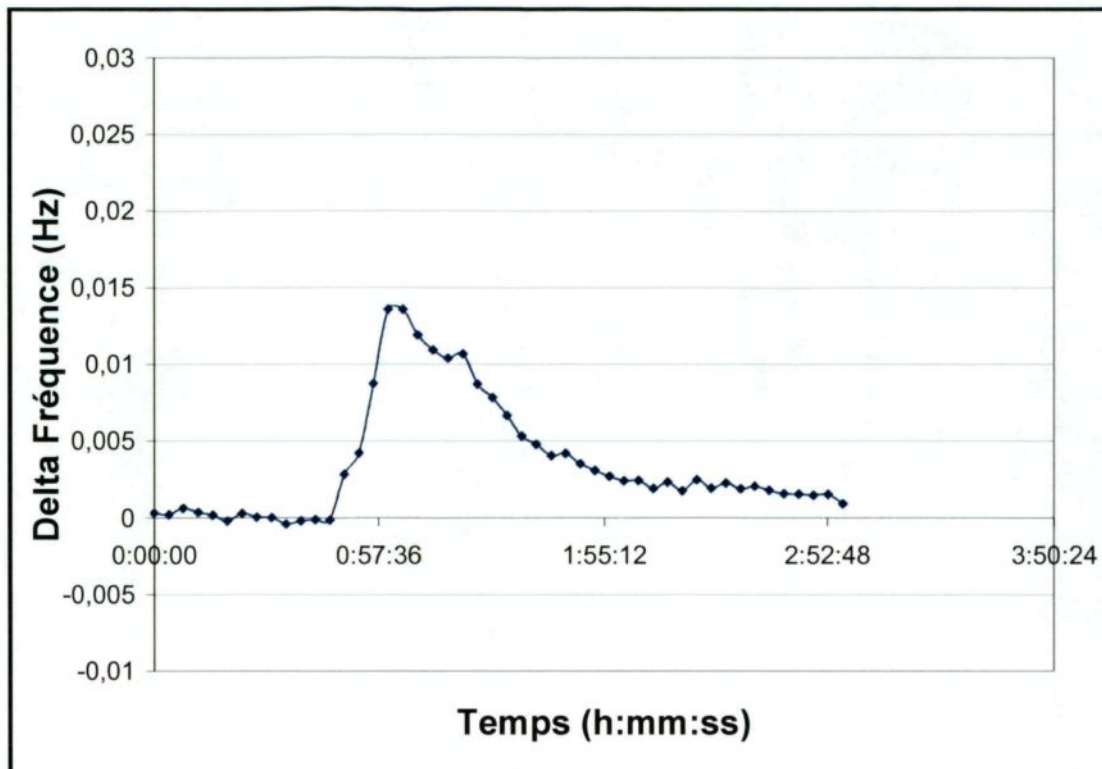




**Figure 6.2 – Lissage de la courbe Delta Fréquence**

#### **6.1.1.3 Recentrage**

Le détecteur de fer est mis en fonction lorsque la pompe de sousverse du décanteur expérimental est activée. Ainsi, l'origine de la courbe ne correspond pas au moment de l'injection du traceur de fer. La courbe doit être recentrée afin que l'origine corresponde au temps d'injection ( $t = 0$ ). La Figure 6.3 présente la courbe Delta Fréquence lissée et recentrée.



**Figure 6.3 – Recentrage de la courbe Delta Fréquence**

#### **6.1.1.4 Conversion de la courbe Delta Fréquence**

L'étape suivante consiste à convertir les différences de fréquence (Hz) en concentrations de fer correspondantes (g/L) à l'aide des courbes de calibration similaires à celle de la Figure 5.12. Bien évidemment, les courbes de calibration utilisées tiennent compte du volume de boue dans la bobine de mesure, du type de boue utilisée ainsi que de la concentration solide de la boue. La Figure 6.4 présente la conversion de la courbe Delta Fréquence de la Figure 6.3. La courbe de concentration du traceur de fer est généralement désignée comme étant la « courbe C(t) ».

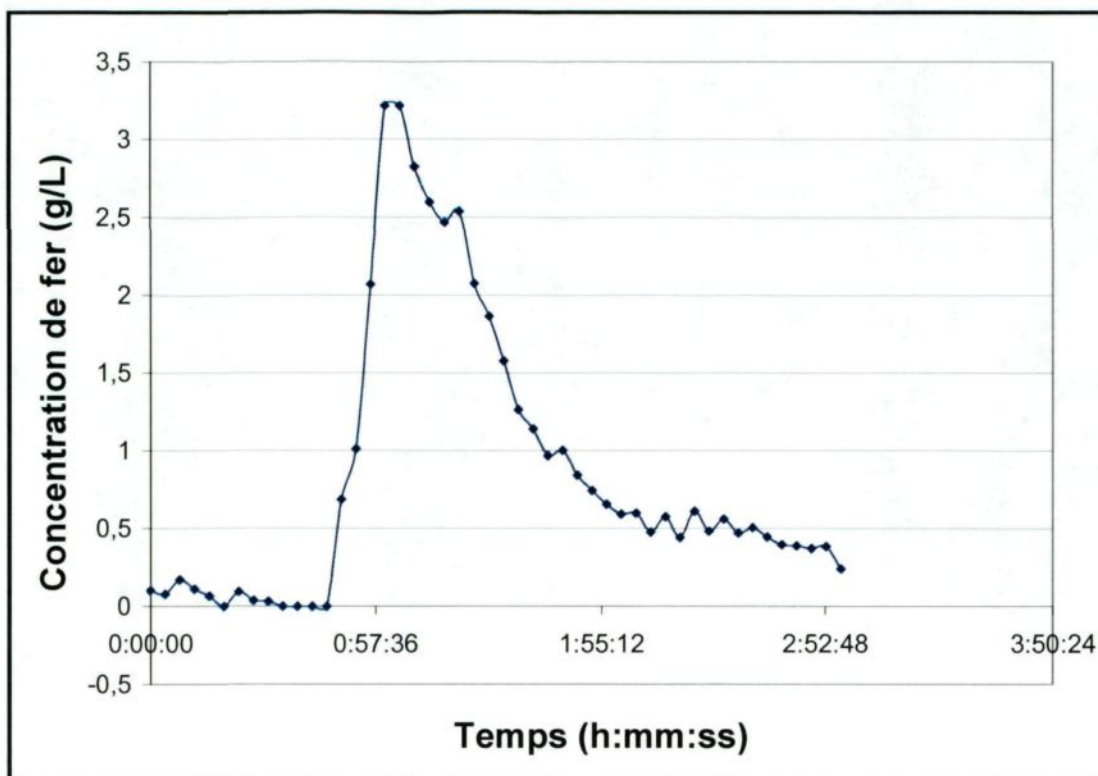


Figure 6.4 – Conversion de la courbe Delta Fréquence

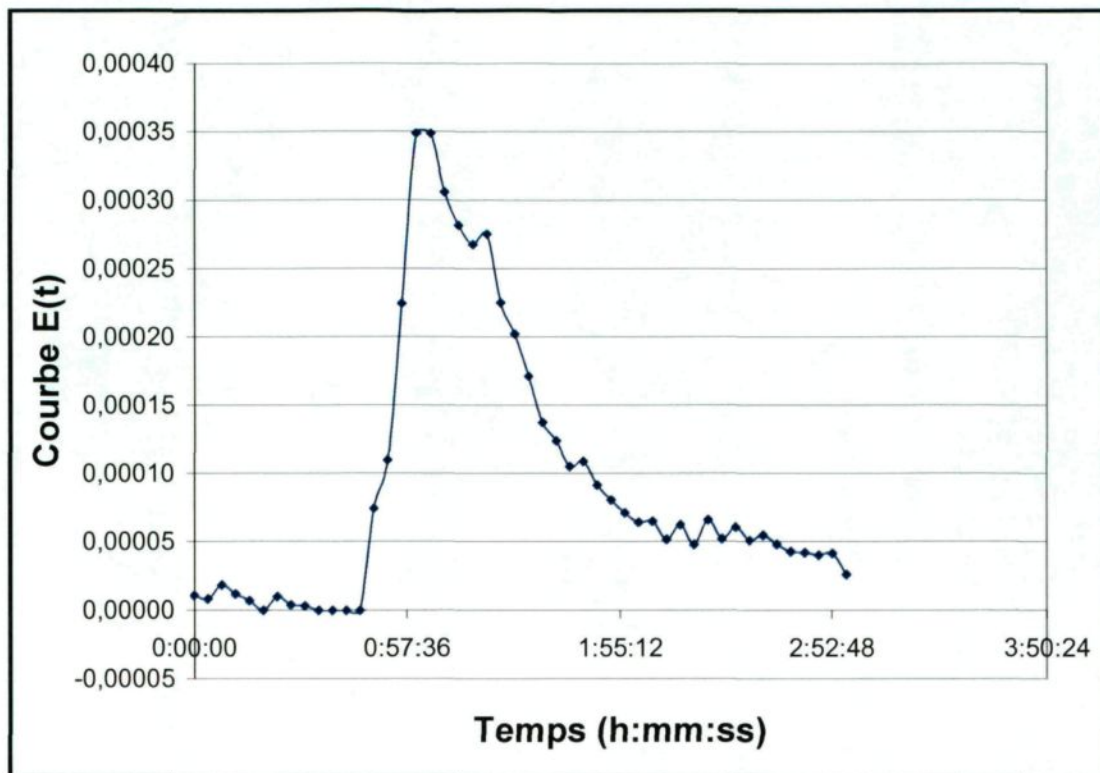
#### 6.1.1.5 Extrapolation de la traînée

Les effets de queue ou traînée sont couramment rencontrés dans les essais de traçage et résultent pour la plupart d'une mauvaise injection du traceur ou encore, indique la présence d'un régime d'écoulement laminaire, transitoire ou très peu turbulent<sup>(89)</sup>. De plus, la précision relative de la traînée est faible puisque les quantités de traceur détectées y sont petites. Une extrapolation des données est parfois nécessaire lorsque la courbe de RTD ne revient pas à zéro. En effet, la traînée de la courbe prend parfois beaucoup de temps avant d'être complètement évacuée. Étant donné le temps disponible pour effectuer les essais, il est difficile de poursuivre les essais plus longtemps pour obtenir la trace complète.

L'objectif de l'extrapolation de la traînée est de déterminer le moment où le traceur est complètement évacué. Bien évidemment, il faut être certain que la traînée non nulle de la courbe est due à un arrêt prématuré de l'acquisition des données et non à une interférence du traceur avec un élément dans le décanteur. La méthode d'extrapolation la plus utilisée consiste à vérifier si la trace diminue de façon exponentielle. Si tel est le cas, une fonction de diminution exponentielle peut donc être ajustée à la traînée et cette fonction est prolongée jusqu'à ce qu'elle soit indissociable du bruit de fond. Peu importe la méthode employée, l'extrapolation de la traînée est difficile et peut être facilement erronée. Selon la courbe de la Figure 6.4, 97,0 % de la quantité de fer injectée est retrouvée. Conséquemment, même si la traînée de la courbe n'est pas nulle, la quantité de fer retrouvée approche suffisamment la totalité pour négliger l'extrapolation de la courbe<sup>(69)(71)</sup>. Par conséquent, aucune extrapolation de la traînée n'est effectuée dans l'analyse des résultats.

### ***6.1.2 Obtention de la courbe RTD ou $E(t)$***

La courbe de RTD ou  $E(t)$  est utilisée pour analyser les essais de traçage. Elle représente la probabilité par unité de temps pour qu'une particule sorte du décanteur à un temps  $t$ . La courbe  $E(t)$  est obtenue de la courbe  $C(t)$  en utilisant les Équations 4.5 et 4.6. Ainsi, en considérant que le débit de la sousverse est à peu près constant durant l'expérimentation, la courbe  $E(t)$  est obtenue en divisant la courbe  $C(t)$  par l'aire sous la courbe. La Figure 6.5 présente la courbe  $E(t)$  obtenue. L'aire sous la courbe est égale à 1.



**Figure 6.5 – Courbe RTD d'un essai expérimental**

### **6.1.3 Obtention de la courbe $E(\theta)$**

La courbe RTD adimensionnelle est très utile pour comparer des systèmes avec des volumes et des temps de résidence différents. Les équations mathématiques pour l'obtention de  $E(\theta)$  ont été présentées à la section 4.3.4. Ainsi, la courbe  $E(\theta)$  est obtenue en multipliant la courbe  $E(t)$  par son temps de résidence. Mentionnons qu'il est important de faire une distinction entre le temps de résidence prévu ou attendu, qui est considéré égal à  $V/Q$ , et le temps de résidence expérimental obtenu par les Équations 4.12 et 4.13. Dans le cas de la Figure 6.5, le temps de résidence attendu est d'environ 140,0 minutes tandis que le temps de résidence expérimental obtenu est d'environ 89,0 minutes. La Figure 6.6 présente



la courbe  $E(\theta)$  correspondant à la courbe  $E(t)$  de la Figure 6.5. Si les temps de résidence attendus et mesurés expérimentalement sont les mêmes, alors la courbe  $E(\theta)$  devrait être centrée à 1. Dans le cas présent, le temps de résidence du décanteur expérimental est plus rapide que celui attendu. Ce type de comportement suggère la présence de volumes morts à l'intérieur du décanteur expérimental.

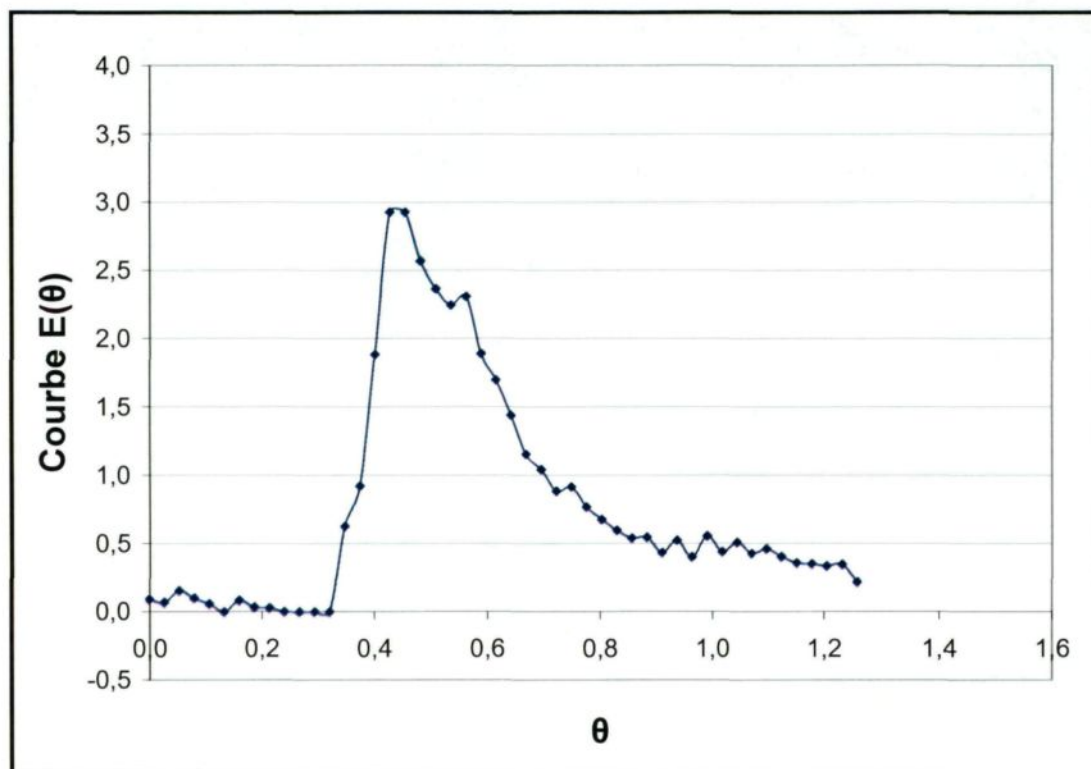


Figure 6.6 – Courbe  $E(\theta)$  d'un essai expérimental

#### 6.1.4 RTD des systèmes à débit variable

Le traitement mathématique précédemment décrit pour obtenir la courbe RTD implique que le système est à l'état d'équilibre. Dans la plupart des essais expérimentaux, les conditions d'opération sont suffisamment stables pour obtenir la courbe RTD à l'aide

des Équations 4.5 et 4.6. Malheureusement, les procédés de séparation solide/liquide sont très difficiles à stabiliser, particulièrement pour les débits à la sousverse du décanteur. Conséquemment, les calculs de la courbe RTD doivent être modifiés afin de tenir compte des variations de débits qui peuvent survenir au cours d'un essai. Les équations mathématiques associées au calcul de la RTD pour des systèmes à débit variable ont été présentées à la section 4.7.1. Ainsi, l'axe de temps standard est remplacé par un axe « Z » qui représente la quantité de matériel qui quitte le système (Équation 4.49).

$$Z(t) = \frac{1}{V} \int_0^t Q(t) dt \quad (\text{Équation 6.1})$$

L'utilisation de cette nouvelle variable Z implique que les variations de débit n'influencent pas le modèle d'écoulement. Cette condition est satisfaite puisque les variations de débits obtenues au cours des essais expérimentaux sont petites. L'Équation 6.1 peut être utilisée directement pour calculer la quantité de matériel évacuée à la sousverse pour des systèmes liquides ou gazeux. Dans le cas d'un procédé de séparation solide/liquide, la quantité de matériel évacuée à la sousverse du décanteur dépend du débit  $Q$  mais également de la fraction solide de la sousverse. En effet, les concentrations de solide à la sousverse peuvent varier durant un essai expérimental. Règle générale, la fraction solide varie avec les changements de débit à la sousverse. Par conséquent, l'équation précédente doit être modifiée pour tenir compte de la concentration solide à la sousverse. Ainsi, la nouvelle équation adimensionnelle de  $Z(t)$  devient :

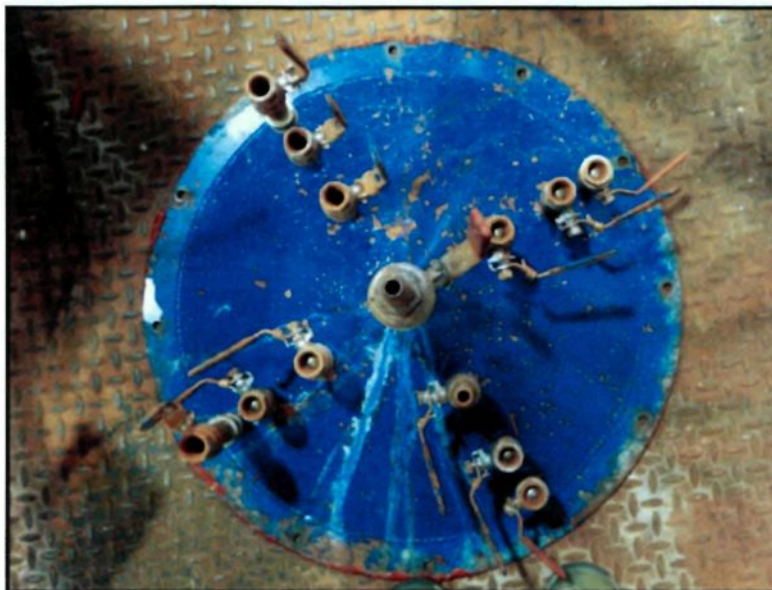
$$Z(t) = \frac{1}{M_{boue}} \int_0^t Q(t) C_{souseverse} dt \quad (\text{Équation 6.2})$$

où  $Q$  est le débit à la sousverse exprimé en litre de boue par minute,  $C_{\text{sousverse}}$  la concentration solide à la sousverse en gramme de boue sèche par litre de boue,  $t$  le temps en minute et  $M_{\text{boue}}$  la masse en gramme de boue sèche correspondant à la quantité de boue qu'il y a dans le décanteur au moment de l'injection. De plus, les essais de traçage visent à simuler le comportement des particules solides de la boue rouge ; donc, il semble plus pertinent d'évaluer la quantité de matière par sa masse plutôt que par le volume de boue correspondant. La concentration solide de la boue varie en fonction de la profondeur. En effet, la force de gravité ainsi que les effets du râteau favorisent la compaction du lit de boue. Ainsi, la concentration solide est plus élevée à la base du lit de boue que dans sa portion supérieure. La masse de boue sèche est évaluée à partir de mesures expérimentales effectuées à travers le lit de boue. Ainsi, en insérant un carottier d'une longueur de 40,0 cm dans les valves situées sous le décanteur (Figure 6.7), il est possible de déterminer le profil de la concentration solide de la boue en fonction de la profondeur. La carotte de boue est divisée en plusieurs portions de 1,0 cm, puis la fraction solide de chacune est mesurée à l'aide d'une balance chauffante. Les mesures démontrent que la concentration solide du lit de boue augmente proportionnellement avec la profondeur et que l'écart est d'environ 10,0 % p/p entre le haut et la base du lit.

La mesure du profil de concentration solide du lit de boue demande beaucoup de temps à faire et par conséquent, le profil n'est pas mesuré pour chaque essai. Des profils mesurés sur différents essais dans des conditions opératoires variables ont démontré que les tendances étaient les mêmes. Ainsi, dans le profil retenu, la fraction solide augmente



linéairement avec la profondeur dans la portion cylindrique du décanteur (augmentation de l'ordre de 10,0 % p/p) et elle est approximativement constante dans la section conique. La masse de boue sèche est obtenue en multipliant le volume de chaque section de boue par sa fraction solide correspondante et en soustrayant le volume associé au râteau.



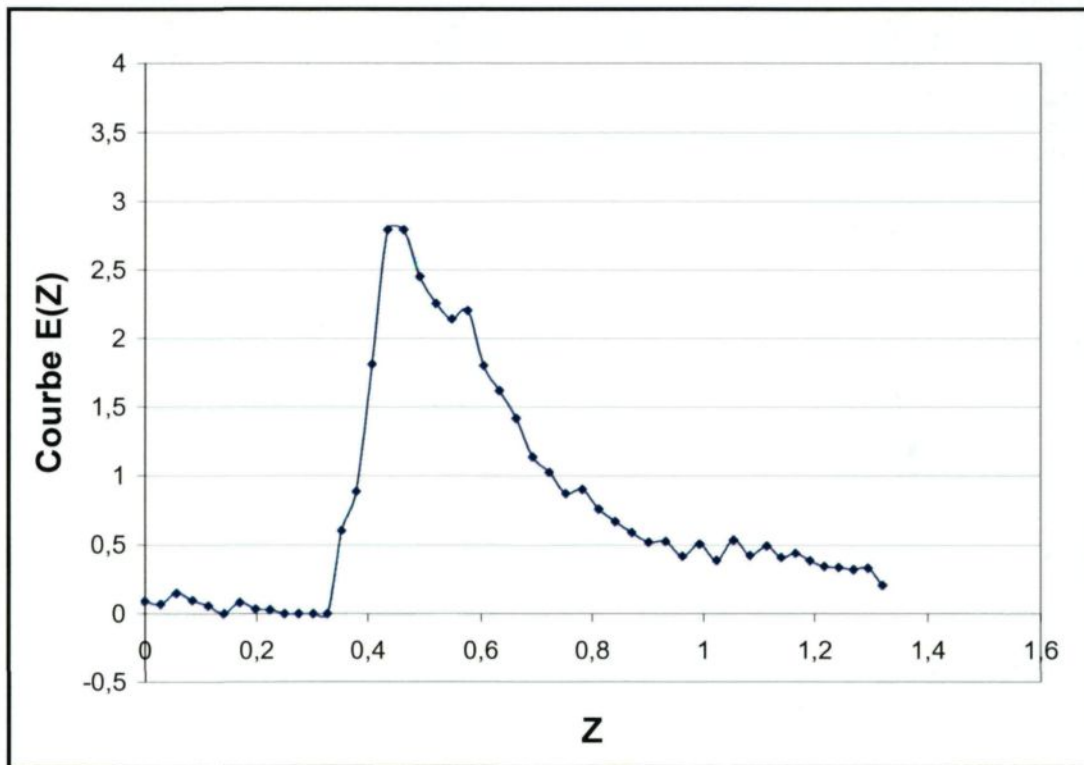
**Figure 6.7 – Valves d'échantillonnage du lit de boue**

Tel que spécifié au Chapitre 4, la variable adimensionnelle  $Z$  a la même signification que la variable  $\theta$  des sections 4.3.4 et 6.1.3. Puisque l'axe de temps standard est relié à la variable  $Z$  (Équation 4.52), il est possible d'exprimer la courbe RTD selon la variable  $Z$  de l'Équation 6.2 ainsi :

$$E(Z) \cong V_0 \frac{E(t)}{Q(t)} = \frac{E(t) M_{boue}}{Q(t) C_{soutverse}} \quad \text{(Équation 6.3)}$$

L'Équation 6.3 démontre que la fonction  $E(Z)$  (ou RVD normalisé de la section 4.7.1.6) représente la probabilité pour qu'une particule sorte du décanteur lorsqu'une

fraction massique  $Z$  a été évacuée à la sousverse de celui-ci. La Figure 6.8 présente la courbe  $E(Z)$  associée à la courbe  $E(\theta)$  de la Figure 6.6. Ces deux dernières courbes sont très semblables. En fait, la courbe  $E(Z)$  est légèrement plus longue (le dernier point apparaît à 1,32 plutôt que 1,26) et est moins haute (sommet à 2,80 versus 2,93). Mais ces différences sont minimales, ce qui indique que le processus de séparation solide/liquide est stable pour cet essai expérimental. Cette particularité est valable pour cet essai et des différences importantes peuvent être observées entre les courbes  $E(Z)$  et  $E(\theta)$  pour d'autres essais.



**Figure 6.8 – Courbe  $E(Z)$  d'un essai expérimental**

### 6.1.4.1 Calcul de $Z_{moyen}$

La valeur moyenne de la courbe  $E(Z)$  est tout aussi importante que la valeur du temps de résidence moyen. Le calcul de  $Z_{moyen}$  a été décrit dans la section 4.7.1.6.1 et est présenté dans l'Équation 6.4. La valeur moyenne de la Figure 6.8 est de 0,65. Autrement dit, le temps de résidence moyen expérimental est d'environ 0,65 fois la valeur de celui attendu initialement. En effet, si on multiplie le temps de résidence attendu par 0,65 ( $0,65 \times 140,0 \text{ min} = 91,0 \text{ min}$ ), on obtient approximativement le temps de résidence mesuré expérimentalement (89,0 min).

$$Z_{moyen} = \frac{\int_0^{\infty} Z E(Z) dZ}{\int_0^{\infty} E(Z) dZ} \approx \frac{\sum_i Z_i E(Z)_i \Delta Z_i}{\sum_i E(Z)_i \Delta Z_i} \quad \text{(Équation 6.4)}$$

## 6.2 Méthode d'analyse

La détermination de la distribution du temps de résidence est une technique largement utilisée dans le domaine du génie chimique. Le succès d'un programme de traçage dépend en grande partie du degré de reproductibilité, de sensibilité et de la rapidité de la technique d'analyse des résultats<sup>(11)</sup>. La méthode de mesure du traceur doit être très rigoureuse et suffisamment précise pour établir un bilan massique significatif du traceur après l'expérimentation<sup>(11)</sup>. Ainsi, la première étape au cours d'un essai de traçage consiste à s'assurer que le système à l'étude est suffisamment stable (atteinte de l'état d'équilibre). Mentionnons qu'il est possible de reproduire des essais de traçage tant au niveau de la trace

obtenue que de la stabilité des conditions opératoires du processus de séparation solide/liquide<sup>5</sup>. De plus, un calcul du bilan massique du traceur de fer détecté à la sortie du décanteur (environ 90,0 %) permet de valider la méthode de mesure utilisée.

L'analyse des résultats obtenus permet de tracer la courbe RTD du décanteur expérimental. La courbe peut être présentée sous sa forme standard  $E(t)$  ou sous une forme adimensionnelle  $E(\theta)$  ou  $E(Z)$ . À partir de ces courbes, une analyse plus poussée permet de définir ou d'expliquer le déplacement de la boue dans le décanteur. Il existe dans la littérature un nombre impressionnant de modèles théoriques ou exploratoires pour interpréter les courbes de RTD. En pratique, il est souhaitable d'utiliser le modèle le plus simple qui permet à la fois d'ajuster adéquatement les données expérimentales et d'obtenir des interprétations physiques raisonnables de l'écoulement<sup>(88)</sup>. Les modèles théoriques les plus connus ont été décrits au Chapitre 4. Ces modèles sont séparés en deux classes : soit les modèles idéaux, comme un réacteur CSTR ou PFR, ou encore non-idéaux, tels que le modèle compartimenté, le modèle de dispersion ou le modèle des réservoirs en série. Malheureusement, aucun de ces modèles ne peut être utilisé directement pour analyser les courbes de RTD d'un décanteur de boue rouge. Par conséquent, deux méthodes d'analyse des courbes ont été élaborées. La première est numérique et effectuée par un programme informatique. La seconde est basée sur une décomposition de la courbe de RTD en plusieurs pics.

---

<sup>5</sup> Une analyse de la reproductibilité des essais de traçage est présentée à la section 6.3

### **6.2.1 Modélisation de la RTD**

Tel que spécifié précédemment, il est souvent très difficile d'analyser les courbes de RTD dans le cas des décanteurs non-idéaux, puisque les courbes obtenues résultent de l'interconnexion de diverses zones où règnent différentes conditions d'écoulement. De manière générale, un modèle d'écoulement satisfaisant peut être développé en associant certains motifs élémentaires pour rendre compte des informations disponibles concernant la structure du décanteur et des écoulements locaux associés. Mentionnons qu'il est très difficile d'explicitier une méthodologie précise dans le choix du modèle utilisé et ceci en raison du nombre important de configurations d'écoulement possibles. Généralement, l'expérimentateur doit lui-même construire le modèle en fonction de sa connaissance du procédé et de la forme de la RTD, ce qui, pour un non-spécialiste, reste une procédure délicate<sup>(116)</sup>. Cependant, certaines règles permettent de définir une stratégie générale. En effet, il existe des relations qualitatives entre les caractéristiques physiques du décanteur, et l'aspect de la courbe RTD d'une part, et la structure du modèle d'autre part. Ainsi, la forme de la courbe RTD révèle plusieurs caractéristiques qualitatives de l'écoulement tels que : le nombre de pics, l'écart entre l'origine et le début de la courbe, la symétrie de la courbe, des épaulements dans la montée et la descente de la courbe ainsi que la présence ou non de trainée ou « queue ».

#### **6.2.1.1 Nombre de pics de la courbe**

Tout d'abord, l'allure générale des courbes permet d'estimer si l'écoulement est plutôt piston (allure de la RTD similaire à un Dirac) ou plutôt parfaitement agité (allure

proche d'une exponentielle). Peu importe l'allure générale de la courbe, le nombre de pics sur celle-ci est très important. Ainsi, lorsqu'il est supérieur à un, le nombre de pics sur la RTD est très caractéristique d'une réalité physique particulière traduite par certains modèles<sup>(116)</sup>. En effet, il a été démontré au Chapitre 4 que certains pics sont reliés à un comportement particulier. Par exemple, s'il y a trois pics et plus dans une courbe, localisés à intervalles réguliers et d'amplitude de plus en plus faible, il est fort probable qu'il y ait présence d'une boucle de recirculation. Ou encore, la présence d'un court-circuit dans l'écoulement est caractérisée par un pic d'amplitude élevée au début de la courbe RTD. Ce pic est généralement considéré comme une portion de l'écoulement et est représenté par une branche qui lui est propre dans un modèle d'écoulement.

#### **6.2.1.2    *Écart entre l'origine et la courbe de RTD***

Il existe toujours un écart plus ou moins important entre le début de la courbe de RTD et le moment de l'injection (temps  $t = 0$ ). Règle générale, si cet écart est petit, il est négligé et la courbe RTD est ramenée artificiellement à  $t = 0$ . Néanmoins, si cet écart est important, il peut être le signe tangible de certaines caractéristiques de l'écoulement. La plupart du temps, la présence d'un écart indique un délai similaire à celui observé pour un écoulement piston.

#### **6.2.1.3    *Symétrie des courbes***

Lorsque la courbe de RTD est symétrique ou à peu près par rapport à son maximum, l'écoulement possède un comportement de type piston « PFR » avec une faible

dispersion axiale. Il est alors facile d'expliquer le comportement de l'écoulement avec des modèles non-idéaux de dispersion axiale ou des réservoirs en série. Les courbes de RTD qui ne sont pas symétriques par rapport à leurs maximums sont plus difficiles à expliquer puisqu'elles contiennent des éléments supplémentaires qui modifient l'écoulement, tels que le court-circuit, le volume mort, une boucle de recirculation, etc.

#### **6.2.1.4    *Épaulements précoces de la courbe***

La présence d'un épaulement ou d'une irrégularité sur la montée de la courbe peut également représenter un comportement particulier de l'écoulement. L'épaulement peut représenter un court-circuit de faible importance. De façon plus générale, ce type de comportement est représentatif des modèles présentant plusieurs branches en parallèles avec des débits relativement différents (le court-circuit étant le cas limite).

#### **6.2.1.5    *Épaulements tardifs de la courbe***

Les irrégularités observées sur la descente de la courbe sont généralement associées à la présence d'un volume mort ou encore à un modèle de recirculation où les pics sont plus ou moins indissociables les uns des autres.

#### **6.2.1.6    *Traînée ou queue de la courbe***

Généralement, une courbe RTD présente une traînée, excepté dans certains cas particuliers comme dans le cas du PFR, du modèle des réservoirs en série parfaitement agités et du modèle de dispersion axiale. Il existe une traînée sur la courbe de RTD lorsque

le temps requis pour que la courbe rejoigne la ligne de base est au moins deux fois supérieure au temps de résidence moyen. La traînée indique la présence de zone morte ou de zone de recirculation dans l'écoulement ou encore, dans une moindre mesure, de plusieurs branches en parallèles.

### **6.2.2 Programme Analyse RTD**

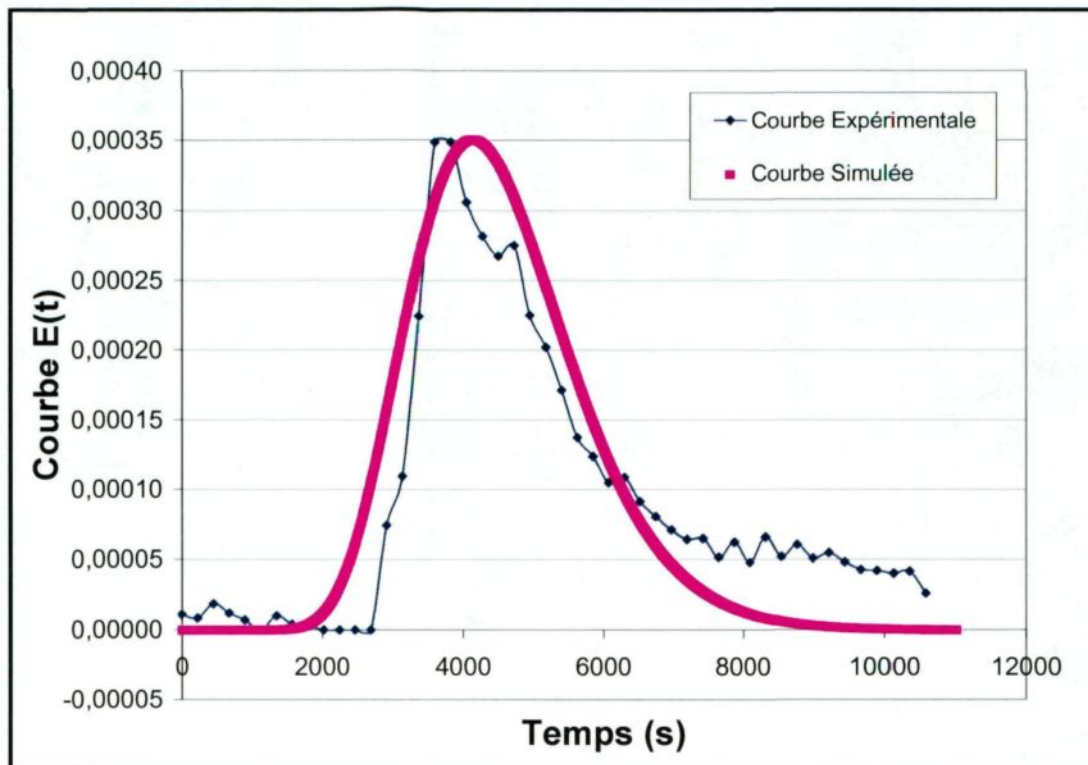
Un modèle d'écoulement doit être développé pour interpréter la RTD suite à l'analyse qualitative des paramètres importants de la courbe (nombre de pics, écart, traînée, etc.) Tel que spécifié précédemment, la méthode la plus utilisée consiste à associer des motifs d'écoulements élémentaires pour reproduire les paramètres qualitatifs de la courbe RTD. La première méthode d'analyse utilisée dans le présent projet fonctionne selon cette approche. L'élaboration d'un modèle utilisant des motifs élémentaires et/ou de modèles non-idéaux est un travail simple, mais sa mise en équation est souvent fastidieuse. Un programme Analyse RTD a donc été développé pour simplifier cette tâche.

Le programme est basé sur le modèle des réservoirs en série, c'est-à-dire qu'un nombre donné de petits réacteurs CSTR en série est utilisé pour représenter le décanteur à l'étude. Mentionnons cependant que le modèle a été adapté pour tenir compte des paramètres physiques tels que la recirculation, les volumes morts et les courts-circuits. Le programme ne peut cependant pas traiter directement un écoulement piston mais il est possible de le recréer en simulant plusieurs réservoirs CSTR en série.



### 6.2.2.1 *Exemple de simulation*

Quelques essais de simulation ont été effectués à l'aide du programme. La Figure 6.9 présente un résultat d'analyse de la RTD à l'aide du programme. Les données expérimentales ont été utilisées comme paramètres de base pour la simulation. Ainsi, un volume de 50,0 L de boue ( $0,05 \text{ m}^3$ ) et un débit de 300,0 mL/min ( $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ) ont été utilisés. En calculant la variance du système à l'aide de l'Équation 4.15 ( $3\,898\,116 \text{ s}^2$ ), il est possible de calculer le nombre de CSTR idéal en série à utiliser pour simuler la courbe expérimentale. Selon l'Équation 4.27, le nombre  $N$  de réservoirs de la RTD expérimentale présenté à la Figure 6.9 est égal à 7. Malheureusement, l'emploi de ces paramètres ne permet pas de simuler adéquatement la courbe expérimentale. En effet, le temps de résidence obtenu expérimentalement est plus court que celui obtenu à l'aide de calcul théorique. Un volume mort ( $\sim 40 \%$ ) doit être ajouté au modèle afin d'obtenir des courbes de temps de résidence similaires. Par conséquent, une analyse plus poussée doit être effectuée. La courbe rose de la Figure 6.9 présente une simulation obtenue pour un modèle d'écoulement à 4 branches en parallèles dont l'une contenant le volume mort. L'erreur moyenne entre les deux courbes ( $\sim 20 \%$  d'erreur) et l'analyse visuelle permettent de constater que les courbes ont la même tendance mais qu'elles ne sont pas identiques. D'autres éléments doivent encore être ajoutés au modèle d'écoulement pour améliorer la correspondance entre les deux courbes. Bref, le programme est utile pour simuler un modèle d'écoulement relativement simple, mais pour des écoulements plus complexes, il est moins adéquat et demande beaucoup de travail pour obtenir une bonne correspondance entre les courbes.



**Figure 6.9 – Simulation d'une courbe RTD**

En somme, cette méthode d'analyse conventionnelle de la RTD permet d'obtenir des écoulements via la création et la schématisation d'un modèle. Cependant, il est très difficile d'associer les portions du modèle à une zone spécifique d'écoulement dans le décanteur. De plus, l'élaboration des modèles ainsi que leurs ajustements sont difficiles à effectuer. C'est pourquoi une nouvelle méthode de décomposition des courbes RTD a été élaborée pour analyser les résultats.

### 6.2.3 *Décomposition des courbes*

Il est possible d'analyser les courbes de RTD d'une façon beaucoup plus simple et efficace en utilisant une méthode de décomposition en plusieurs pics. Considérons que la courbe de RTD représente la somme des différents écoulements présents à l'intérieur du décanteur. Ainsi, l'isolation et l'identification de chacun des écoulements présents dans la RTD permettraient une meilleure compréhension du déplacement de la boue. En observant la forme des courbes  $E(t)$  et  $E(Z)$ , on constate qu'elles sont similaires à celles obtenues par chromatographie<sup>(71)(115)</sup>. La chromatographie est une technique qui permet d'effectuer la séparation et l'analyse chimique des mélanges. La plupart des analyses chromatographiques nécessitent la décomposition d'un chromatogramme complexe en ses différents pics se superposant afin de faciliter l'analyse des produits en présence. Lors de l'analyse des courbes RTD, en présence de formes tortueuses et/ou d'épaulements, il peut être très avantageux d'utiliser une méthode d'analyse semblable à celle utilisée en chromatographie pour obtenir les comportements d'écoulement.

Les pics chromatographiques sont généralement caractérisés par leur forme, leur position, leur largeur ainsi que par leur amplitude. L'élargissement des pics découle de différents phénomènes, tels que la diffusion axiale, la dispersion, la résistance au transfert de masse et à la cinétique<sup>(116)</sup>. Ainsi, il faut considérer les pics de la RTD comme les différents types d'écoulements existant dans le décanteur. Chaque pic représentant une branche parallèle ajoutée au modèle d'écoulement. En somme, il est possible d'utiliser une méthode de décomposition similaire à celles des courbes chromatographiques pour analyser

les courbes de RTD obtenues expérimentalement. Généralement, la base de décomposition des pics chromatographiques est constituée de courbes Gaussiennes avec un élargissement exponentiel tel que :

$$h(t) = \frac{a_0}{2a_3} \exp\left(\frac{a_2^2}{2a_3^2} + \frac{a_1 - t}{a_3}\right) \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{t - a_1}{\sqrt{2}a_2} - \frac{a_2}{\sqrt{2}a_3}\right) + 1 \right] \quad (\text{Équation 6.5})$$

$$\operatorname{erf} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (\text{Équation 6.6})$$

où  $a_0$  est l'aire du pic Gaussien,  $a_1$  le centre du pic Gaussien,  $a_2$  la largeur du pic Gaussien et  $a_3$  la constante de temps de l'exponentielle et  $\operatorname{erf}$  la fonction d'erreur. L'apparence de la fonction présentée à l'Équation 6.5 est similaire à une Gaussienne avec une traînée exponentielle à la droite.

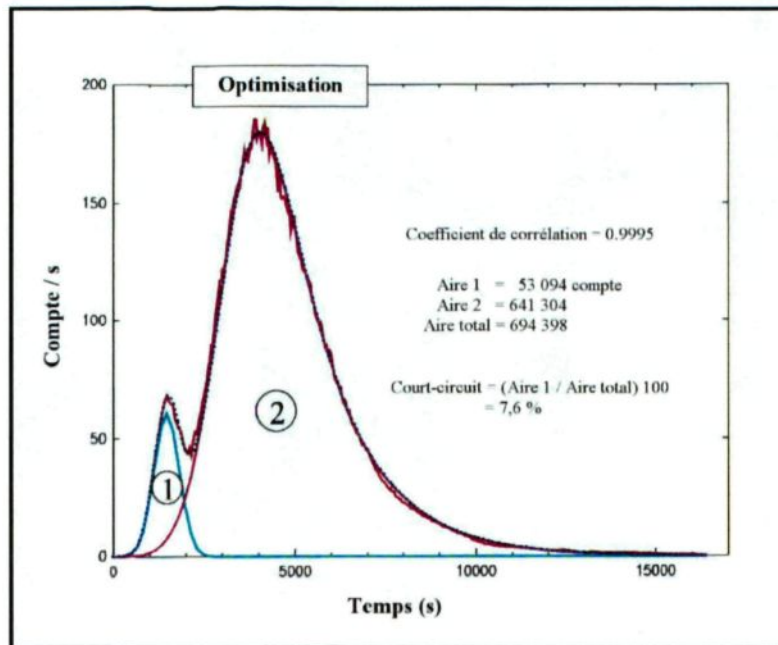
Outre la fonction Gaussienne, plusieurs autres types de fonction peuvent être utilisés pour décomposer les pics et dans bien d'autres domaines que la chromatographie<sup>(117)(118)</sup>. Dans le cadre du présent projet, une méthode de décomposition des pics a été utilisée mais avec une base de décomposition différente. En effet, les courbes Gaussiennes sont plutôt associées au modèle de dispersion axiale présenté à la section 4.6.2. L'Équation 4.28 du modèle des réservoirs en série a été utilisée comme base de décomposition des courbes de RTD. Le modèle des réservoirs en série a été choisi parce qu'il est simple d'utilisation et facile à interpréter. Ainsi, selon les Équations 4.17 et 4.28, l'équation de décomposition de chacun des pics est :

$$E(\theta) = \tau E(t) = \left(\frac{t}{\tau}\right)^{N-1} \frac{N^N}{(N-1)!} e^{-tN/\tau} \quad (\text{Équation 6.7})$$

Bien évidemment, l'Équation 6.7 doit être modifiée pour tenir compte des débits variables et des variations de la concentration solide du lit de boue et de la boue à la sousverse. Ainsi, tel que discuté à la section 6.1.4, le temps de résidence  $\tau$  est remplacé par  $Z_{\text{moyen}}$  et les valeurs du temps  $t$  par celles de  $Z$ .

$$E(Z) = \left( \left( \frac{Z}{Z_{\text{moyen}}} \right)^{N-1} \frac{N^N}{(N-1)!} e^{-ZN/Z_{\text{moyen}}} \right) \times \text{facteur amplitude} \quad (\text{Équation 6.8})$$

Le facteur d'amplitude quantifie la portion d'aire relative de chacun des pics par rapport à l'aire globale<sup>(119)</sup>. Ainsi, en variant la valeur  $N$  (nombre de CSTR en série),  $Z_{\text{moyen}}$  (temps de résidence moyen exprimé selon  $Z$ ),  $Z$  et le facteur d'amplitude il est possible d'isoler les principaux pics de la courbe RTD à l'aide de l'Équation 6.8. L'avantage de cette méthode de décomposition est qu'elle permet de quantifier ou d'estimer la portion d'écoulement d'un pic par rapport à la trace globale. La Figure 6.10 présente un exemple de décomposition en deux pics<sup>(71)</sup>. On constate qu'une portion de l'écoulement apparaît plus rapidement, indiquant la présence d'un court-circuit. L'analyse de la courbe décomposée permet de distinguer chacun des pics spécifiques. Des informations quantitatives peuvent alors être obtenues à partir du ratio des aires de chaque pic<sup>(71)(115)</sup>.



**Figure 6.10 – Exemple de décomposition de pic**

La Figure 6.11 présente des exemples plus complexes de décomposition de courbes RTD<sup>(71)</sup> obtenues expérimentalement en traçant la phase solide d'un incinérateur. On observe que chacune des deux courbes de RTD est composée d'un ensemble de plusieurs petites courbes. Le modèle de dispersion axial a été utilisé pour décomposer les courbes RTD. Trois paramètres de base ont été utilisés : la vitesse, la dispersion et l'aire sous la courbe. Le succès et la reproductibilité d'une méthode de décomposition dépendent en grande partie du nombre de paramètres utilisés. Bref, l'intérêt de la méthode de décomposition en pics d'une courbe RTD est d'obtenir des informations quantitatives et qualitatives des essais de traçage, surtout lorsque les pics obtenus se superposent et que certains peuvent être attribués à un phénomène physique particulier. Malheureusement, les courbes RTD ne peuvent être décomposées automatiquement par un ordinateur et la routine

d'un programme numérique. Les connaissances d'un opérateur qui possède l'habilité d'effectuer et de déterminer les comportements observés dans la courbe RTD<sup>(71)</sup> sont requises. Celui-ci doit s'assurer que la décomposition est physiquement significative et analyser la validité de la décomposition en évaluant les solutions potentielles, en identifiant la solution la plus fiable et en évaluant les limites de l'interprétation<sup>(71)</sup>.

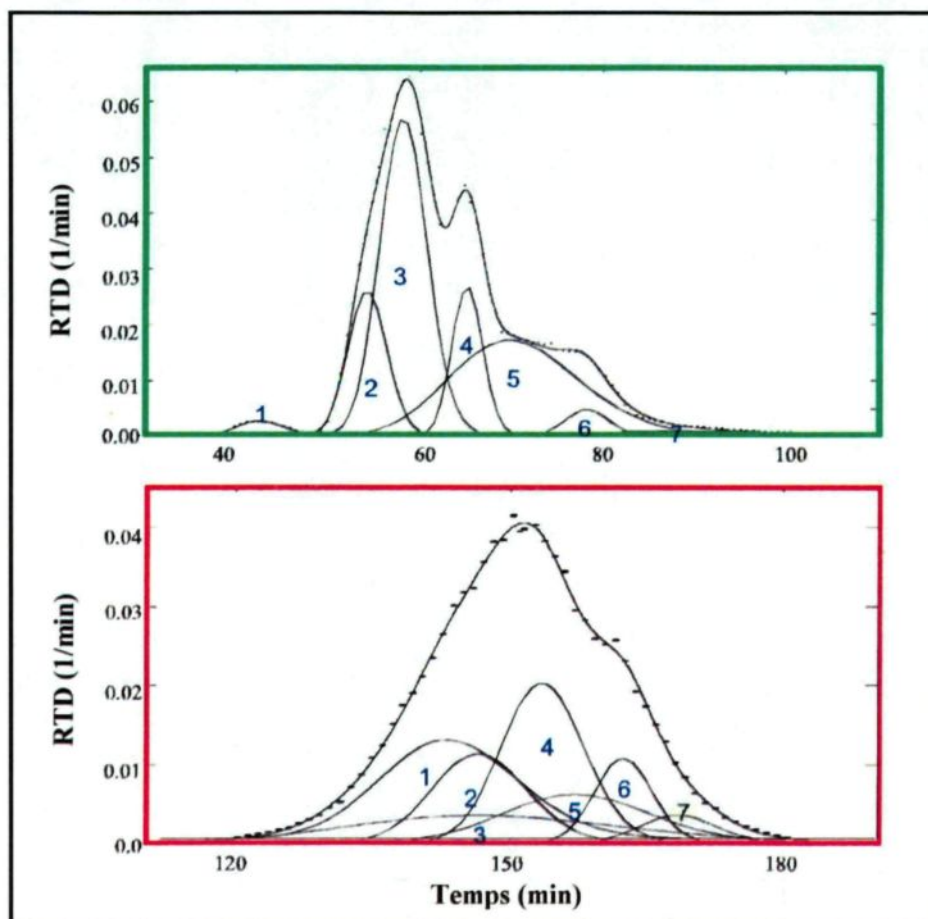


Figure 6.11 – Décomposition de courbes RTD



### 6.2.3.1 Étapes de décomposition

La méthode de décomposition des pics s'effectue selon l'ordre d'apparition des pics majeurs. Autrement dit, le premier pic à être décomposé est le plus important de tous. Prenons le cas de la courbe de la Figure 6.8. On observe visuellement la présence de deux pics, d'une traînée et d'un délai avant le début de la trace. L'analyse des mesures expérimentales permet d'obtenir la valeur de  $Z_{\text{moyen}} = 0,65$  ainsi que de la variance  $\sigma^2 = 0,059$  de cette courbe. L'ajustement du modèle des réservoirs en série à la trace globale de l'écoulement indique que 7 CSTR en série devraient normalement bien simuler l'écoulement. Malheureusement, ce modèle ne correspond pas à la trace obtenue expérimentalement, tel qu'observé à la Figure 6.12.

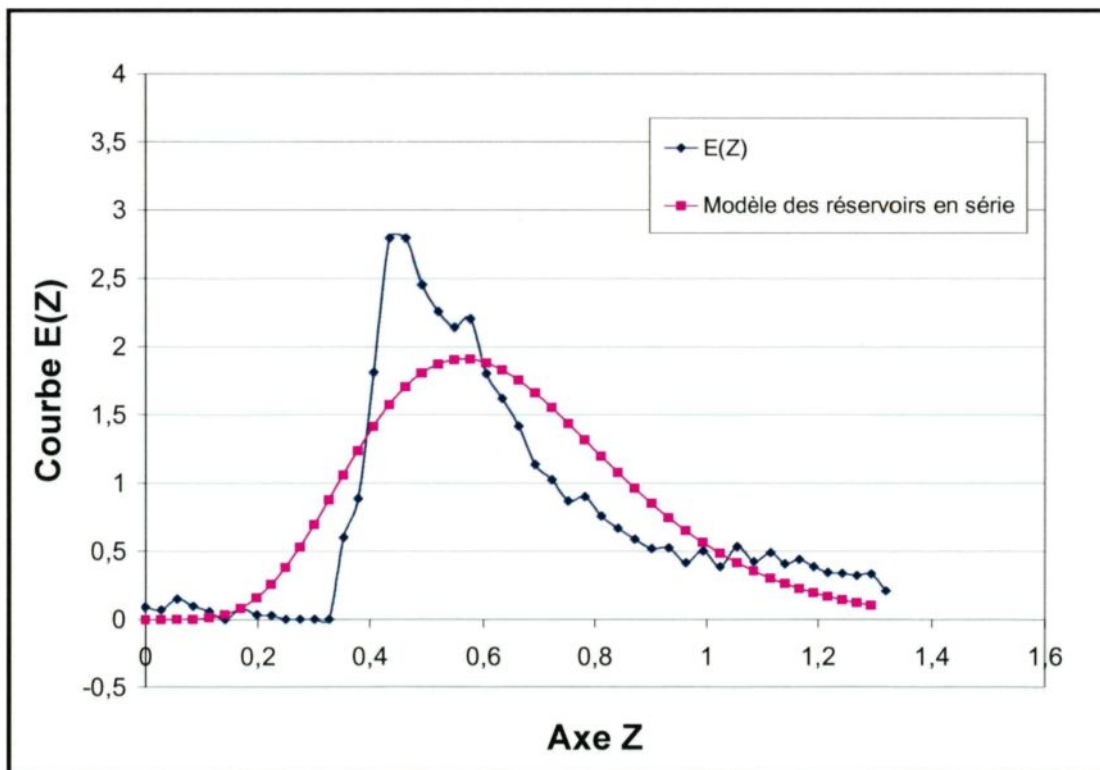


Figure 6.12 – Simulation à l'aide du modèle des réservoirs en série



La Figure 6.13 présente la même courbe  $E(Z)$  et la décomposition du premier pic. L'Équation 6.8 a été utilisée avec les paramètres suivants :  $Z_{\text{moyen}}$  du premier pic = 0,48, nombre de CSTR  $N = 6$  et un facteur d'amplitude de 2,8. Autrement dit, le premier pic est centré à 0,48 et est simulé par 6 CSTR en série. Le facteur d'amplitude augmente ou diminue la taille du pic afin de jauger son importance relative dans la décomposition. L'aire relative à ce premier pic est de 40,5 %. Donc, l'écoulement global dans le décanteur est composé d'un chemin ou d'une zone où circule 40,5 % du matériel, dans un laps de temps plus court ( $Z_{\text{moyen}} = 0,48$ ) que le temps d'écoulement global ( $Z_{\text{moyen}} = 0,65$ ), indiquant ainsi la présence d'une zone d'écoulement plus active dans le décanteur.

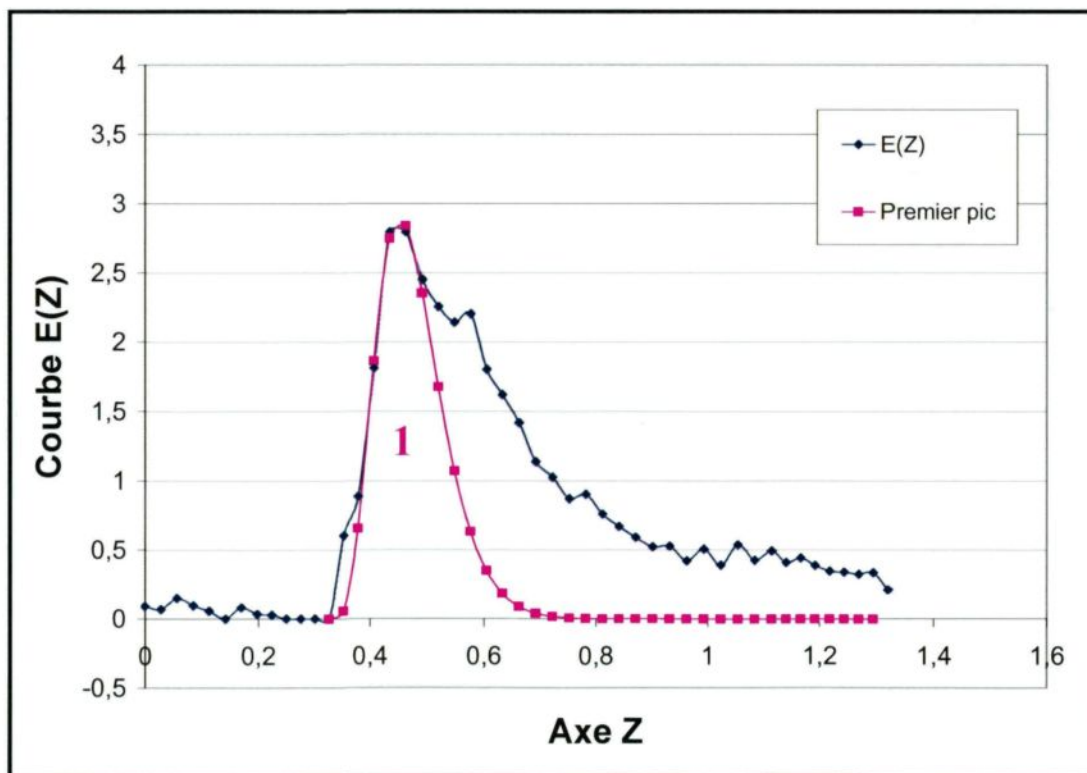


Figure 6.13 – Décomposition du premier pic

La seconde étape après avoir déterminé le premier pic consiste à soustraire de la RTD la portion de l'écoulement qui y est associée. Une nouvelle courbe  $E(Z)$  est ainsi obtenue. La Figure 6.14 présente la courbe résiduelle obtenue «  $E(Z)$  résiduelle du premier ordre » ainsi que la décomposition du deuxième pic. Les valeurs associées à ce deuxième pic sont :  $Z_{\text{moyen}} = 0,63$ ,  $N = 5$  et un facteur d'amplitude de 1,6. L'aire du second pic est de 25,1 %. Donc, une portion de l'écoulement (25,1 %) est simulée par 5 CSTR en série et circule à la même vitesse que l'écoulement global de la courbe ( $Z_{\text{moyen}} = 0,65$ ).

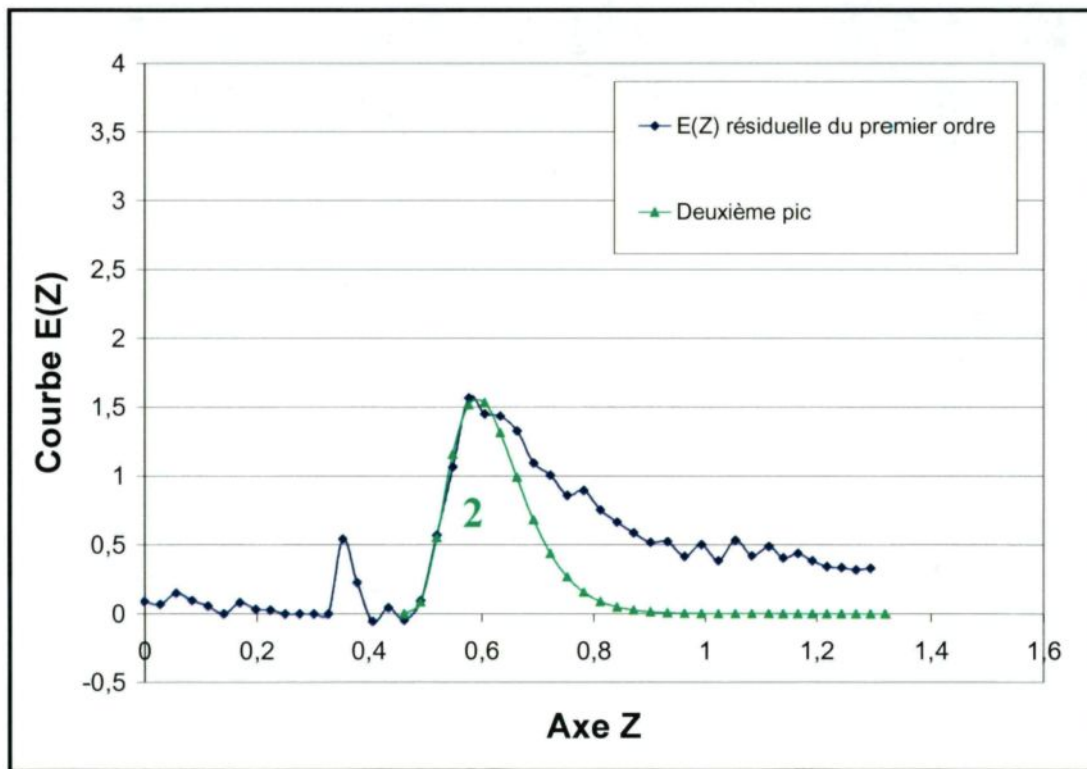


Figure 6.14 – Courbe  $E(Z)$  résiduelle de 1<sup>er</sup> ordre et décomposition du second pic

En soustrayant le deuxième pic de la courbe  $E(Z)$  résiduelle de premier ordre, on obtient une nouvelle courbe résiduelle sur laquelle il est possible de décomposer un troisième pic. La Figure 6.15 présente la courbe  $E(Z)$  résiduelle de deuxième ordre et la décomposition du troisième pic. Les valeurs associées à cette décomposition sont :  $Z_{\text{moyen}} = 0,89$ ,  $N = 3$  et un facteur d'amplitude de 0,8. L'aire de la courbe de décomposition du troisième pic est de 20,9 %. La valeur  $Z_{\text{moyen}}$  du troisième pic est beaucoup plus élevée que celle obtenue pour la trace globale de 0,65. Conséquemment, cette zone est plus lente que l'écoulement global et indique probablement la présence de volume mort dans le décanteur ou d'une zone moins active.

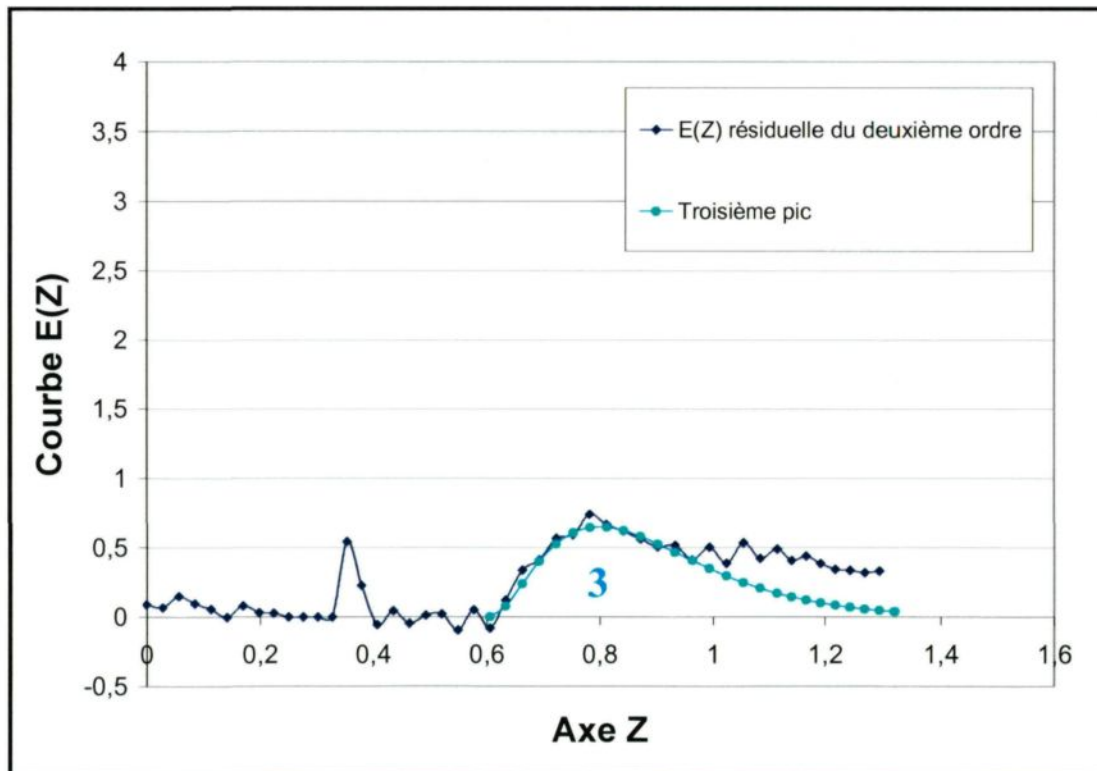
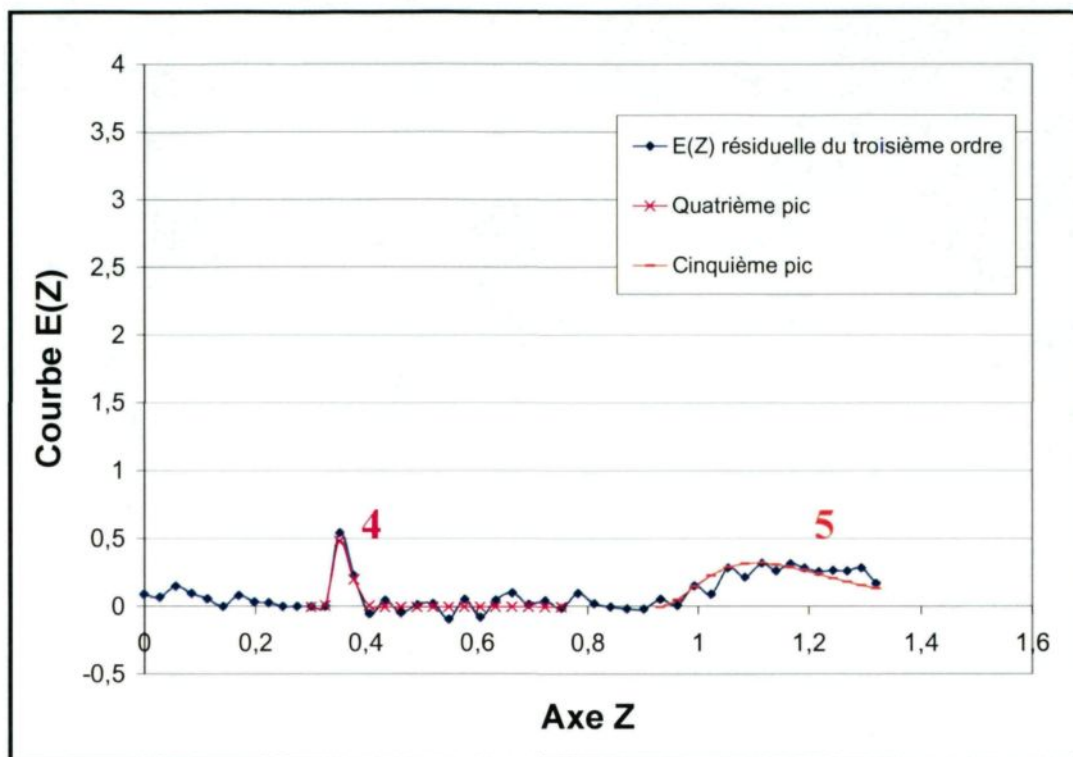


Figure 6.15 – Courbe  $E(Z)$  résiduelle de 2<sup>e</sup> ordre et décomposition du troisième pic

En répétant ce processus de décomposition, on retrouve encore deux autres pics. La Figure 6.16 présente la courbe  $E(Z)$  résiduelle de troisième ordre après la soustraction du troisième pic ainsi que les décompositions des pics quatre et cinq. Les valeurs associées au quatrième pic sont :  $Z_{\text{moyen}} = 0,36$ ,  $N = 18$ , un facteur d'amplitude de 0,3 et une aire de 3,2 %. Les valeurs associées au cinquième pic sont :  $Z_{\text{moyen}} = 1,19$ ,  $N = 3$ , un facteur d'amplitude de 0,4 et une aire de 8,3 %. Le quatrième pic apparaît beaucoup plus rapidement que les autres pics indiquant qu'une portion de l'écoulement globale (3,2 %) est court-circuitée dans le décanteur. À l'opposé, le cinquième pic apparaît beaucoup plus tardivement indiquant ainsi que 8,3 % de l'écoulement est piégé dans une zone très lente voire morte. Si on effectue la soustraction des pics quatre et cinq de la courbe  $E(Z)$  résiduelle de troisième ordre, on obtient la courbe résiduelle finale contenant que du bruit de fond. Par conséquent, les cinq principaux pics de la courbe  $E(Z)$  ont été décomposés et identifiés. En effectuant la somme des aires sous la courbe des cinq pics, on retrouve une aire globale de 98,0 %. Le pourcentage manquant se retrouve dans le résidu final de la courbe  $E(Z)$  qui n'est pas décomposée.

On observe également sur la Figure 6.16 que le cinquième pic n'est pas complet. En effet, la partie manquante se situe normalement dans la traînée de la RTD qui n'a pas été mesurée. Pour certains domaines de recherche, la valeur de la traînée est très importante mais, dans notre cas, elle représente une zone d'écoulement de moindre importance. Plusieurs chercheurs<sup>(89)(120)(121)</sup> s'entendent pour dire que la correction de la traînée ainsi

que sa modélisation ne justifie pas le temps supplémentaire requis pour les effectuer. Autrement dit, les informations obtenues ne justifient pas le travail supplémentaire.



**Figure 6.16 – Courbe  $E(Z)$  résiduelle de 3<sup>e</sup> ordre et décomposition des pics quatre et cinq**

En somme, il est possible de décomposer la courbe d'écoulement  $E(Z)$  en cinq pics. La Figure 6.17 présente l'ensemble des pics décomposés ainsi que la RTD expérimentale obtenue. L'analyse de la décomposition indique que l'écoulement de la boue s'effectue via trois zones principales : une zone active rapide (pic 1 et 4), une zone intermédiaire (pic 2) et une zone lente (pic 3 et 5). La fraction de la boue traversant chacune de ces zones est proportionnelle à l'aire des pics divisée par la valeur  $Z_{\text{moyen}}$  de chacun : 51,6 % pour le pic



1, 24,3 % pour le pic 2, 14,4 % pour le pic 3, 5,4 % pour le pic 4 et 4,3 % pour le pic 5.

Ainsi, plus de la moitié de la boue introduite dans le décanteur est traitée par la zone rapide du décanteur.

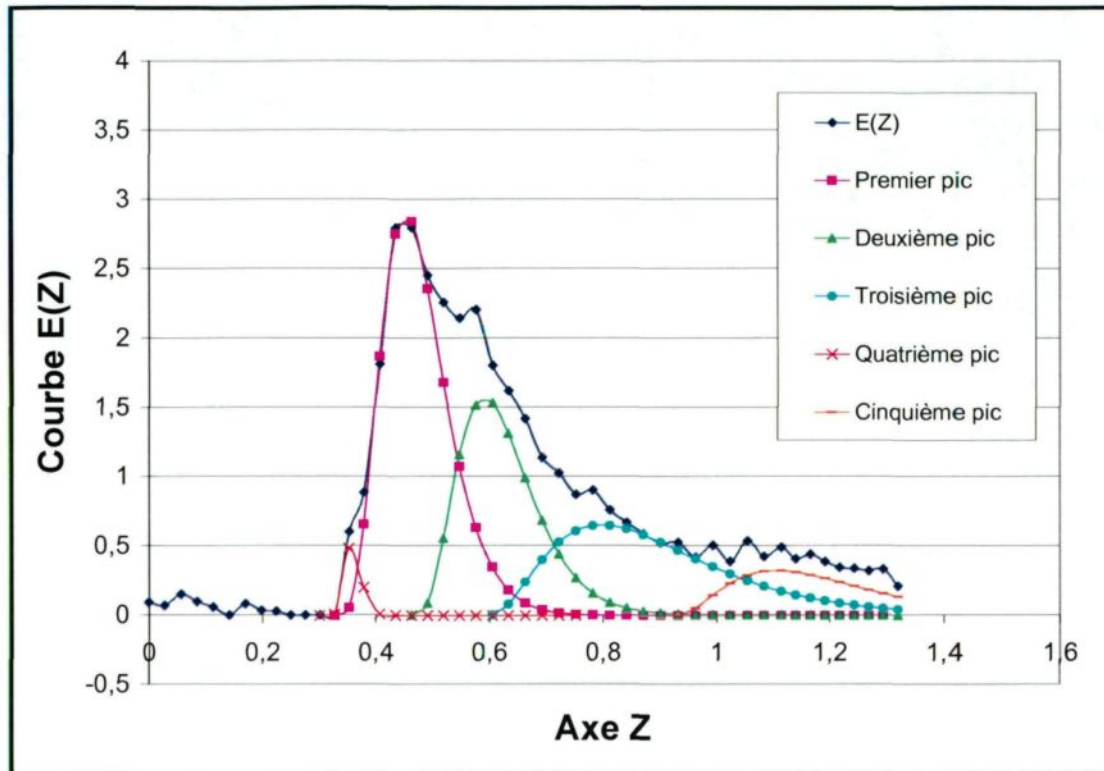
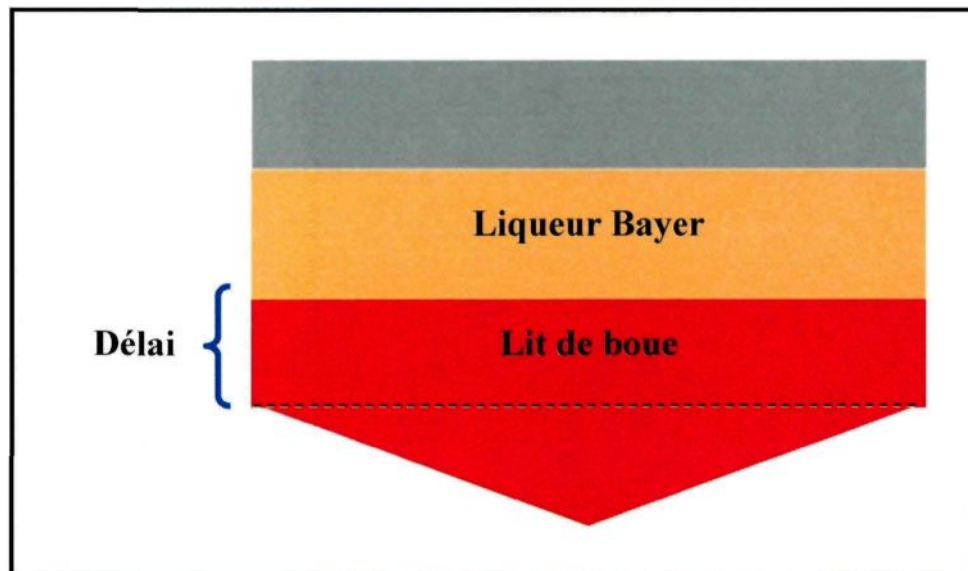


Figure 6.17 – Décomposition de l'écoulement global

### 6.2.3.2 *Emplacement des zones d'écoulement*

La méthode de décomposition de la RTD a permis de cibler 3 principales zones d'écoulement à l'intérieur du décanteur. De plus, le délai sur la courbe RTD peut également être associé à un écoulement spécifique à l'intérieur du décanteur. Afin d'obtenir une meilleure analyse de la courbe RTD, les 3 zones d'écoulement et le délai doivent être localisés à l'intérieur du décanteur expérimental. Pour se faire, on doit conceptualiser

l'écoulement de la boue dans le lit de boue. Tout d'abord, les agrégats se déposent à la surface du lit puis la boue se compacte lentement lorsque les agrégats s'enfoncent dans le lit de boue. Ce type de déplacement s'effectue tout le long de la portion du lit située dans la partie cylindrique du décanteur (Figure 6.18). En effet, le déplacement de la boue dans cette portion du décanteur ne s'effectue que par gravité et le transport de la boue s'effectue donc vers le bas. Ce type d'écoulement ressemble à celui observé dans un PFR où la boue doit traverser un tuyau d'une longueur donnée ce qui est représenté par la présence d'un délai dans la courbe RTD. Selon la courbe  $E(t)$  de la Figure 6.5, le délai correspond approximativement à une durée de 45,0 min ou à une valeur de 0,32 selon  $Z$ .



**Figure 6.18 – Zone d'écoulement PFR dans le décanteur expérimental**

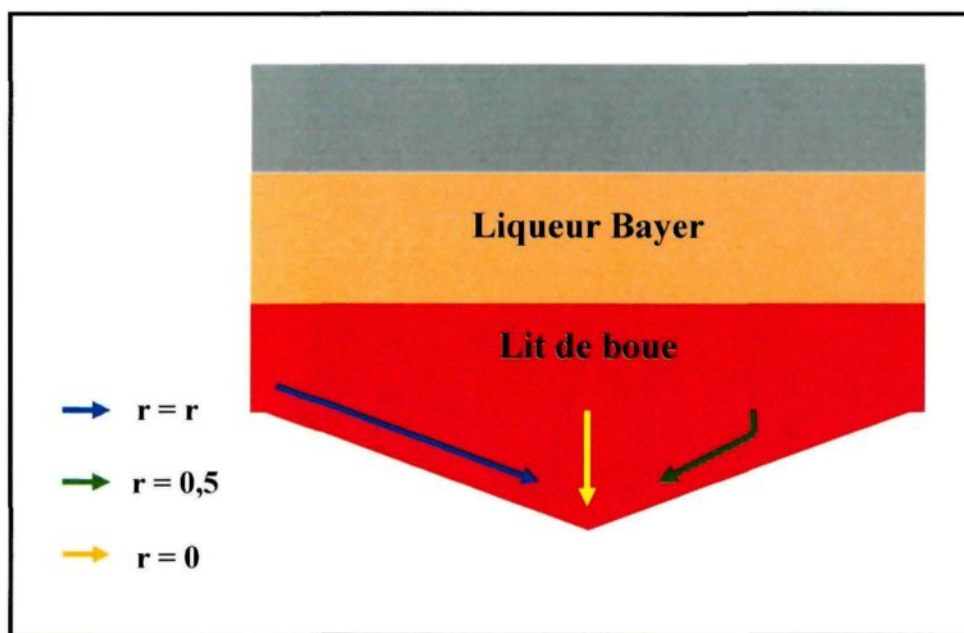
Puisque le délai observé est associé à l'écoulement PFR du traceur dans la portion cylindrique du lit de boue, la décomposition des cinq pics est alors associée à l'écoulement de la boue dans la zone conique du décanteur, induite sous l'action du râteau. Supposons

d'abord que chacune des zones identifiées est associée à un volume de boue situé à une distance spécifique de la sousverse. Ainsi, la zone la plus lente est associée à un volume de boue près des parois du décanteur ( $r = r$ ) tandis que, la zone la plus rapide est localisée près du centre ( $r = 0$ ). Selon la courbe  $E(t)$ , le premier pic apparaît à 45,0 min ( $Z = 0,32$ ) après l'injection du traceur, le second pic après 60,0 min ( $Z = 0,49$ ) et le troisième pic après 80,0 min ( $Z = 0,61$ ). En soustrayant le temps associé au passage du traceur dans la portion cylindrique on obtient 0 min ( $Z = 0$ ), 15,0 min ( $Z = 0,17$ ) et 35,0 min ( $Z = 0,29$ ). L'espacement entre chaque pic consécutif est d'environ 15,0 min.

Selon la section 3.3.5.6 et l'Annexe B, l'écoulement de la boue dans un décanteur est régi en grande partie par la vitesse de rotation du râteau. Ainsi, dans la portion conique du décanteur, la boue est poussée radialement par chaque lame vers la sousverse située au centre du décanteur. Supposons qu'un volume de boue, équivalent à l'interstice entre les lames, est déplacé vers la sousverse du décanteur à chaque passage du râteau. Supposons également que la longueur du déplacement est équivalente à l'interstice entre les lames et qu'elle est approximativement constante pour l'ensemble du râteau. Par conséquent, un élément de volume situé au voisinage de la paroi du décanteur doit être déplacé successivement par huit lames avant d'atteindre la sousverse. Ainsi, la durée de déplacement de la boue le long du râteau est fonction de la vitesse de rotation. Par exemple, si le râteau tourne à une vitesse de 1 rotation par 4,0 minutes, le temps nécessaire pour transporter la boue est de l'ordre d'environ 32,0 à 36,0 minutes (8 rotations pour traverser 9 espaces). Cet estimé du temps de transport de la boue le long du rayon du décanteur est



fonction de la fraction solide de la boue. En effet, si la boue est très liquide, elle s'écoule tout simplement par gravité sans l'aide du râteau. À l'inverse, si la fraction solide est très élevée, alors le temps de passage peut être plus long. La fraction solide obtenue au cours des essais expérimentaux est d'environ 50 % p/p. À cette concentration, la boue est suffisamment épaisse pour se supporter et s'empiler légèrement sans être trop difficile à manipuler. L'observation du lit de boue après une expérimentation confirme également que le déplacement de la boue s'effectue d'un anneau de volume à l'autre en fonction de la vitesse de rotation du râteau. Par conséquent, les temps d'apparition des trois premiers pics correspondent approximativement aux temps de transport de la boue par le râteau en fonction de l'emplacement de la zone associée à chaque pic (Figure 6.19).



**Figure 6.19 – Écoulement de la boue dans la portion conique du décanteur**

Les pics 4 et 5 sont beaucoup moins importants que les autres. Selon l'hypothèse précédente, le pic 4 correspond à un court-circuit mineur, situé près de la zone centrale du décanteur (possiblement le long de l'arbre de rotation du râteau). Le pic 5, quant à lui, est plutôt associé à la zone découlement près des parois. En effet, lorsqu'un volume de boue est déplacé à l'aide du râteau, il est mélangé ou dilué au travers d'autres volumes de boue créant ainsi un phénomène de dispersion (Annexe B). Plus le volume de boue est près de la paroi, plus la trace obtenue est élargie et diffuse (le râteau agit comme un mélangeur). En somme, le pic 5 représente la continuité de l'écoulement de la zone lente.

### **6.3 Reproductibilité des essais de traçage**

La méthode d'analyse des résultats précédemment présentée semble très utile pour obtenir des informations sur le comportement et le déplacement de la boue dans le décanteur. Néanmoins, les hypothèses émises doivent être validées à l'aide d'essais expérimentaux. La première étape expérimentale du présent projet consiste à déterminer la reproductibilité des essais de traçage. En effet, si les courbes obtenues ne sont pas reproductibles, il est alors impossible de déterminer la signature typique de problématiques données. L'évaluation de la reproductibilité s'effectue sur deux aspects : la reproductibilité du processus de séparation solide/liquide et la reproductibilité de la signature ou trace obtenue via les essais de traçage. Deux types de boue ont été utilisés au cours des essais expérimentaux. Le degré de reproductibilité a été évalué à partir de ces deux types de boue.

### **6.3.1 *Premier type de boue***

Plusieurs essais exploratoires ont été effectués afin de déterminer les paramètres adéquats à la réalisation d'un processus de séparation solide/liquide dans les conditions retrouvées dans le laboratoire du GRUSSL. Les conditions et paramètres de base sont : une alimentation de 50,0 g/L, un volume de boue dans le décanteur de 50,0 L, une vitesse de sédimentation variant entre 15,0 et 20,0 m/h et une fraction solide à la sousverse d'environ 50,0 % p/p. Le temps de résidence estimé est d'environ 2h20 pour un débit de sousverse de 0,35 L/min. Normalement, un temps de résidence est nécessaire pour remplir le décanteur de boue au niveau désiré. Ensuite, la sousverse est activée et un autre temps de résidence est nécessaire pour atteindre un état d'équilibre. Une fois l'équilibre atteint, le traceur de fer est injecté puis la courbe de RTD est enregistrée pendant deux autres temps de résidence pour s'assurer que la majeure partie du traceur a été détectée. Le dosage de flocculant utilisé est de 100 g/tonne. Le dosage a été déterminé à partir d'essais exploratoires en cylindre pour obtenir une vitesse de sédimentation dans les limites précédemment mentionnées. La vitesse de rotation du râteau est fixée à 15 rotations par heure. L'alimentation est introduite à l'aide d'un système de tuyauterie. La colonne de liqueur au-dessus du lit de boue est d'environ 30,0 cm ou d'un volume de liqueur équivalent à 56,0 L.

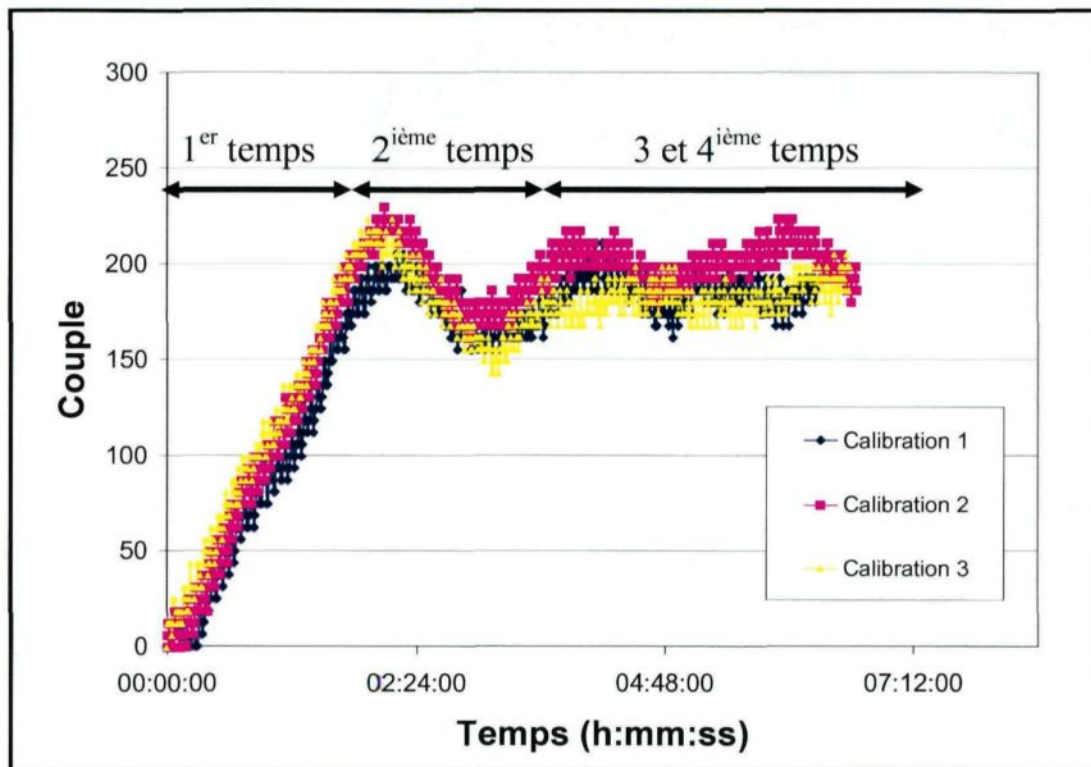
La reproductibilité du processus de décantation est vérifiée en reproduisant trois fois un même essai de référence avec les paramètres et conditions précédemment établies. Tel que spécifié au Chapitre 5, plusieurs mesures sont effectuées au cours de l'essai pour valider la reproductibilité. Ainsi, des mesures de débits (alimentation, liqueur Bayer,

suspension de boue rouge, sousverse, flocculant), de fraction solide de l'alimentation, de vitesse de sédimentation, de niveau de boue ainsi que de la fraction solide à la sousverse sont effectués. Le Tableau 6.1 présente la moyenne des mesures des paramètres de contrôle au cours de chacun des essais de calibration ainsi que la valeur de l'écart-type associée. La valeur de l'écart-type pour la plupart des mesures effectuées est faible, indiquant ainsi un bon contrôle des paramètres d'opération du décanteur. La fraction solide obtenue à la sousverse est cependant plus élevée que celle initialement prévue (53,0 % p/p plutôt que 50,0 % p/p). D'autre part, le débit obtenu à la sousverse est plus faible que celui prévu (308,0 mL/min versus 350,0 mL/min) pour un volume de boue de 50,0 L (niveau de boue  $\approx$  21,0 cm).

|  | Calibration 1  | Calibration 2  | Calibration 3  | Moyenne        |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Alimentation (g/L)</b>                              | 51,5 $\pm$ 3,8 | 50,0 $\pm$ 1,5 | 51,1 $\pm$ 1,6 | 50,9 $\pm$ 2,3 |
| <b>Débit total (liqueur + suspension boue) (L/min)</b> | 5,0 $\pm$ 0,1  | 5,0 $\pm$ 0,1  | 5,0 $\pm$ 0,2  | 5,0 $\pm$ 0,1  |
| <b>Fraction solide à la sousverse (% p/p)</b>          | 53,5 $\pm$ 0,5 | 53,3 $\pm$ 0,8 | 52,6 $\pm$ 0,6 | 53,1 $\pm$ 0,6 |
| <b>Débit sousverse (mL/min)</b>                        | 308 $\pm$ 18   | 309 $\pm$ 15   | 306 $\pm$ 17   | 308 $\pm$ 17   |
| <b>Niveau de boue (cm)</b>                             | 21,0 $\pm$ 0,5 | 21,0 $\pm$ 0,5 | 21,5 $\pm$ 0,5 | 21,0 $\pm$ 0,5 |
| <b>Dosage (g/tonne)</b>                                | 98 $\pm$ 3     | 96 $\pm$ 3     | 102 $\pm$ 4    | 98 $\pm$ 3     |
| <b>Vitesse de sédimentation (m/h)</b>                  | 18,0 $\pm$ 1,8 | 16,7 $\pm$ 1,6 | 19,4 $\pm$ 1,8 | 18,0 $\pm$ 1,7 |

**Tableau 6.1 – Mesures expérimentales et écart-type des essais de calibration, boue # 1**

La valeur du couple appliqué sur le râteau est un autre indice de l'état de stabilité du processus de séparation solide/liquide. La Figure 6.20 présente les mesures expérimentales du couple appliqué sur le râteau durant les essais de calibration. Le couple est mesuré à partir du début de l'essai. Il est exprimé selon une échelle arbitraire et sa valeur ne représente pas une valeur physique réelle liée à des unités. Pour les besoins du projet, seule la tendance de la courbe est nécessaire.



**Figure 6.20 – Reproductibilité du couple appliqué au râteau**

On observe que durant le premier temps de résidence (temps de remplissage), le couple augmente en fonction du temps. En effet, durant cette portion de l'essai, la boue s'accumule à l'intérieur du décanteur et se compacte sous l'action de la gravité et du râteau.

La résistance du lit de boue à la rotation du râteau (couple) augmente donc avec l'augmentation de la fraction solide. La sousverse est activée à partir du second temps de résidence. La mesure du couple subit alors des fluctuations jusqu'à l'atteinte d'un état d'équilibre correspondant au troisième et quatrième temps de résidence. Mentionnons que la valeur du temps de résidence est inférieure à celle initialement prévue.

Pour les essais de calibration, la poudre de fer est injectée dans la conduite d'alimentation. La quantité de traceur injectée correspond approximativement à une concentration de 1,0 gramme de fer par litre de boue. Ainsi, lorsque le décanteur est à l'état d'équilibre, la quantité de fer à injecter est évaluée en fonction du volume de boue présent dans le décanteur à ce moment. Des quantités de 48,27 g, 47,34 g et 48,28 g de fer ont respectivement été injectées dans l'essai de calibration 1, 2 et 3. Les courbes de  $E(t)$ , obtenues pour les essais de calibration, sont présentées à la Figure 6.21. Un taux de recouvrement du traceur de fer après chacun des essais est de 97,0 % pour l'essai 1, 92,7 % pour l'essai 2 et 89,0 % pour l'essai 3. Ainsi, environ 90 % du fer est retrouvé après les expérimentations. La quantité manquante est probablement dans la traînée de la courbe qui n'est pas toujours complète ou encore est perdue dans le bruit de fond des mesures de fréquences. Néanmoins, le degré de reproductibilité du bilan massique du traceur permet de valider la méthode de traçage et de détection utilisée dans l'évaluation de la RTD d'un décanteur de boue rouge. D'autre part, on observe sur la Figure 6.21 des particularités communes aux trois courbes : un délai d'environ 45,0 min, une montée rapide, deux pics principaux d'amplitude élevée et une traînée. Le temps de résidence moyen de chacune des



courbes est de 89,0 min, 87,0 min et 80,0 min. Il est possible d'évaluer la reproductibilité des courbes en calculant l'écart-type moyen obtenu entre les trois courbes :  $1,2 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$ . La barre d'erreur de la Figure 6.21 représente le double de la valeur de l'écart-type moyen. Une autre méthode de comparaison utilisée consiste à évaluer l'erreur moyenne d'une distribution de valeur aléatoire discrète. Cette méthode a été développée pour le programme Analyse RTD et consiste à effectuer la différence absolue entre les courbes et à moyenner toutes les valeurs par rapport à la valeur maximale de la courbe. En utilisant cette technique, on obtient une erreur de 6,3 %. Peu importe l'approche utilisée, la majorité de erreurs proviennent essentiellement de la montée de la courbe. Puisqu'il est impossible de reproduire parfaitement le même lit de boue, la reproductibilité obtenue est excellente.

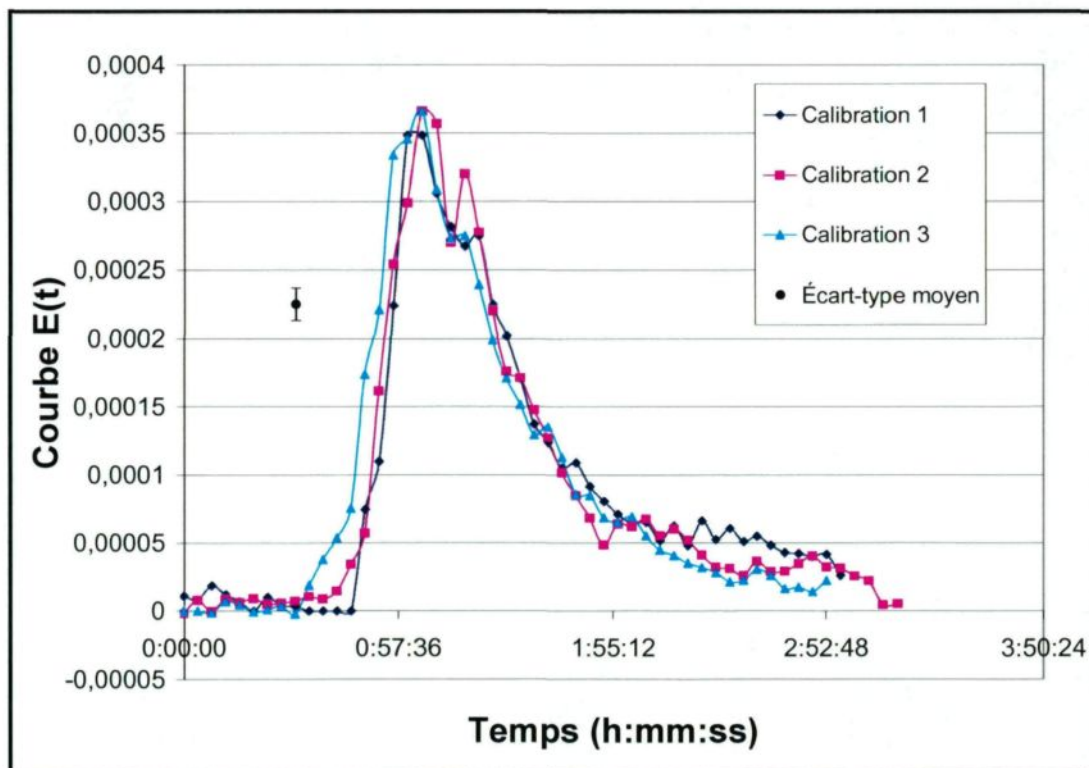


Figure 6.21 – Reproductibilité des courbes E(t), boue # 1

La Figure 6.22 présente les courbes  $E(Z)$  correspondantes aux courbes  $E(t)$  de la Figure 6.21. La reproductibilité des courbes  $E(Z)$  est plus difficile à évaluer puisque les valeurs de  $Z$  de chacune des courbes ne sont pas forcément au même endroit. Il est alors possible d'interpoler les courbes pour effectuer les calculs. Notons que dans ce cas particulier, les courbes sont presque au même endroit. L'écart-type moyen obtenu est de 0,21 (la barre d'erreur représente le double de l'écart-type moyen) et l'erreur moyenne est de 7,0 % (similaire à celle obtenue précédemment). Bref, un bon degré de reproductibilité est également observé sur les courbes  $E(Z)$ . La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  de chacune des courbes est de 0,65, 0,64 et 0,59.

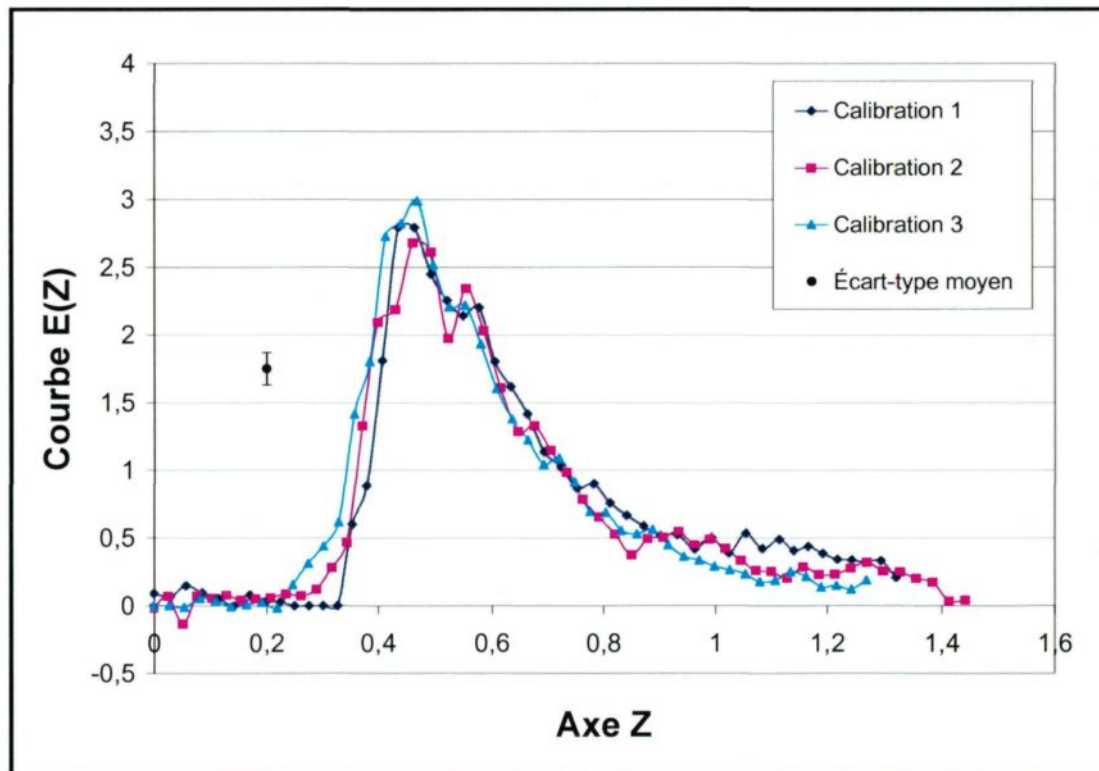


Figure 6.22 – Reproductibilité des courbes  $E(Z)$ , boue # 1



Chacune des courbes est analysée à l'aide de la méthode de décomposition en pics. Les Tableaux 6.2, 6.3 et 6.4 présentent les données de décomposition des courbes soit : le nombre  $N$  de réservoirs CSTR en série, la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  et l'aire sous la courbe de chacun des pics décomposé. L'essai de calibration 1 est celui qui a été utilisé précédemment lors de la démonstration de la méthode de décomposition des courbes (voir section 6.2.3.1 pour l'explication des comportements des zones).

Il est intéressant de constater que les décompositions des trois essais de calibration sont similaires. En fait, la position des pics de décomposition ( $Z_{\text{moyen}}$ ) ainsi que le nombre ( $N$ ) de CSTR utilisés pour les calculer sont presque identiques d'un essai à l'autre. Ainsi, les écoulements et les déplacements de la boue sont similaires dans chacun des essais. On observe cependant plus de variations entre les aires de chaque pic décomposé. Néanmoins, le pic 1 est toujours le plus important, suivi dans l'ordre par le pic 2 et le pic 3. Donc, la quantité de matériels traités par chacune des zones d'écoulement peut différer légèrement d'un essai à l'autre, mais l'importance relative des zones reste la même. Des variations d'aire plus importantes sont cependant observées pour les pics 4 et 5. En observant la Figure 6.21 et 6.22, on constate que les portions des courbes les moins reproductibles sont associées aux pics 4 et 5. Conséquemment, ces zones sont plus sensibles aux variations du procédé, même si celles-ci sont minimales.

| N             | Calibration 1 | Calibration 2 | Calibration 3 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Premier pic   | 6             | 6             | 6             |
| Deuxième pic  | 5             | 4             | 4             |
| Troisième pic | 3             | 3             | 3             |
| Quatrième pic | 18            | 14            | 18            |
| Cinquième pic | 3             | 3             | 3             |

Tableau 6.2 – Nombre de CSTR utilisés pour simuler l'écoulement, boue # 1

| $Z_{\text{moyen}}$ | Calibration 1 | Calibration 2 | Calibration 3 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| Premier pic        | 0,48          | 0,49          | 0,48          |
| Deuxième pic       | 0,63          | 0,63          | 0,65          |
| Troisième pic      | 0,89          | 0,80          | 0,86          |
| Quatrième pic      | 0,36          | 0,38          | 0,36          |
| Cinquième pic      | 1,19          | 1,01          | 1,19          |

Tableau 6.3 –  $Z_{\text{moyen}}$  spécifique de chacun des pics, boue # 1

| Aire (%)      | Calibration 1 | Calibration 2 | Calibration 3 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Premier pic   | 40,5          | 46,3          | 49,8          |
| Deuxième pic  | 25,1          | 18,7          | 22,5          |
| Troisième pic | 20,9          | 14,8          | 14,2          |
| Quatrième pic | 3,2           | 5,5           | 7,0           |
| Cinquième pic | 8,3           | 9,0           | 5,5           |

Tableau 6.4 – Aire spécifique de chacun des pics, boue # 1

### 6.3.2 *Deuxième type de boue*

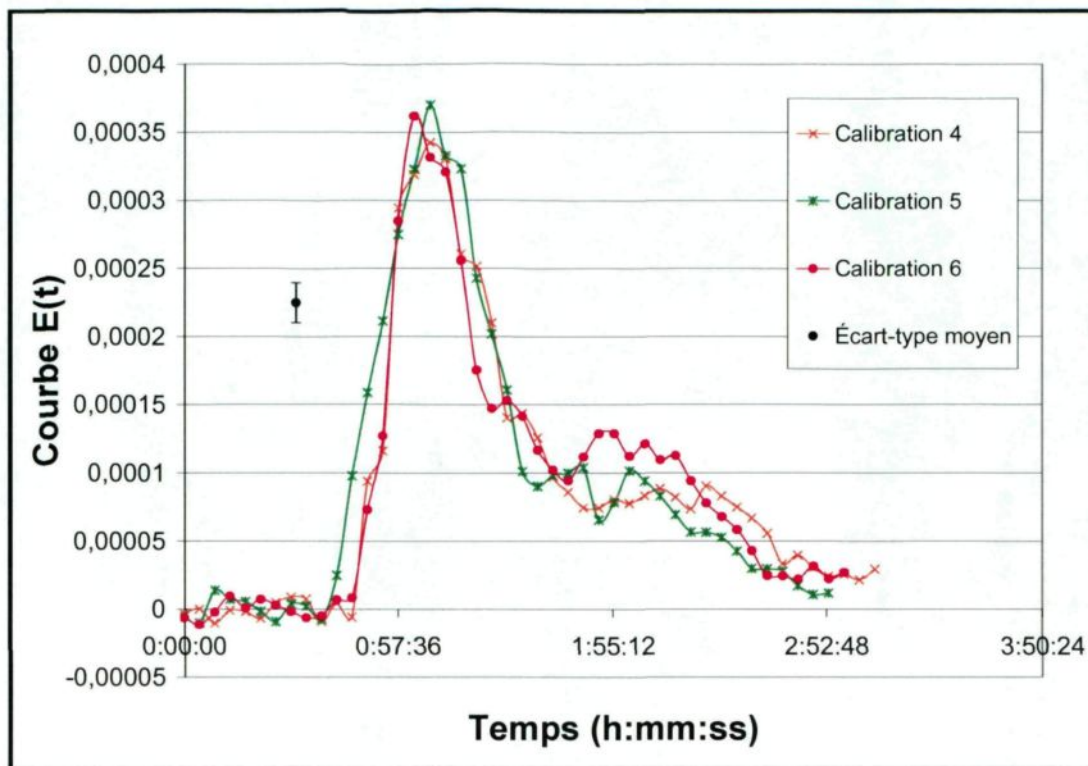
L'analyse de la reproductibilité des essais de calibration avec le deuxième type de boue est effectuée de la même façon que pour le premier type. Tel que spécifié précédemment, la composition de la suspension de boue rouge influence grandement les paramètres d'opération du processus de séparation solide/liquide. Conséquemment, il est possible que les résultats obtenus avec les deux types de boue diffèrent. Le Tableau 6.5 présente la moyenne des mesures des paramètres de contrôle effectuée au cours des essais de calibration 4, 5 et 6. Ces mesures sont similaires à celles du Tableau 6.1 et les valeurs des écart-types sont du même ordre de grandeur. La concentration solide de la sousverse est l'une des différences majeures. En effet, la concentration solide à la sousverse est plus basse avec le second type de boue (49,0 % p/p versus 53,1 % p/p). Puisque le débit de boue délivré par la pompe de sousverse est influencé par la fraction solide de celle-ci (voir Figure 5.27), il est donc normal d'observer une augmentation du débit moyen de la sousverse (333 mL/min versus 308 mL/min) avec une diminution de la concentration solide.

Le comportement du couple observé pour ces essais est similaire à celui obtenu pour le premier type de boue. Cependant, la valeur à laquelle le couple se stabilise est légèrement inférieure (une valeur numérique de 170 versus 200). Cette diminution s'explique en partie par la différence de concentration solide à la sousverse. En effet, les forces opposées au mouvement du râteau sont probablement moins élevées dans un lit de boue de concentration solide plus faible.

|  | Calibration 4 | Calibration 5 | Calibration 6 | Moyenne    |
|--|---------------|---------------|---------------|------------|
| <b>Alimentation (g/L)</b>                              | 49,8 ± 1,0    | 52,9 ± 2,0    | 52 ± 2,6      | 51,6 ± 1,8 |
| <b>Débit total (liqueur + suspension boue) (L/min)</b> | 4,9 ± 0,1     | 5,0 ± 0,1     | 4,9 ± 0,2     | 4,9 ± 0,1  |
| <b>Fraction solide à la sousverse (% p/p)</b>          | 49,2 ± 0,4    | 48,9 ± 0,6    | 48,9 ± 0,4    | 49,0 ± 0,5 |
| <b>Débit sousverse (mL/min)</b>                        | 310 ± 7       | 347 ± 20      | 341 ± 25      | 333 ± 17   |
| <b>Niveau de boue (cm)</b>                             | 21,5 ± 1,0    | 22,5 ± 1,0    | 22,5 ± 0,5    | 22,0 ± 1,0 |
| <b>Dosage (g/tonne)</b>                                | 97 ± 5        | 100 ± 3       | 101 ± 3       | 99 ± 3     |
| <b>Vitesse de sédimentation (m/h)</b>                  | 18,9 ± 2,4    | 19,6 ± 2,0    | 20,0 ± 2,6    | 19,5 ± 2,3 |

**Tableau 6.5 – Mesures expérimentales et écart-type des essais de calibration, boue # 2**

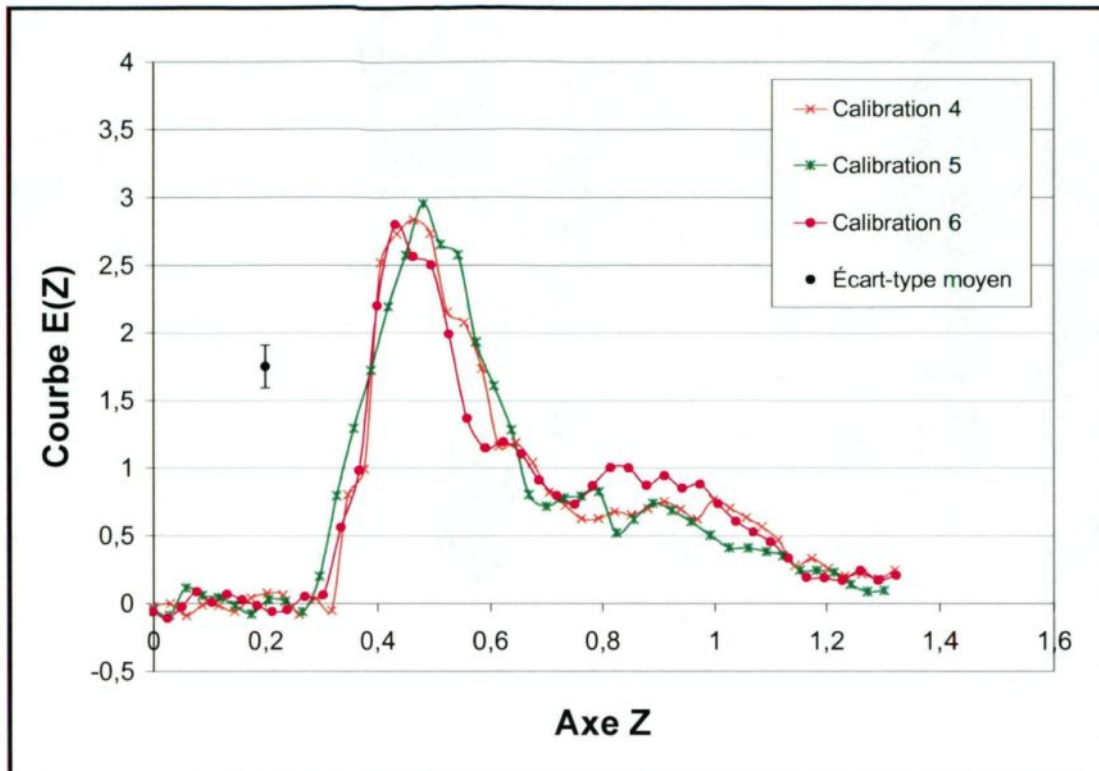
La Figure 6.23 présente les courbes  $E(t)$  obtenues pour les essais de calibration avec le deuxième type de boue. Les particularités observées sont : un délai de 45,0 min, une montée rapide, deux principaux pics et une traînée. Mentionnons cependant que les deux principaux pics sont plus rapprochés que pour la précédente calibration et que la traînée des courbes est plus saccadée. Conséquemment, l'écart-type moyen obtenu est plus élevé que précédemment ( $1,5 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$ ) avec une erreur de 6,7 %. Les taux de recouvrement du traceur de fer après chaque essai sont respectivement de 99,0 %, 94,2 % et 90,8 % pour les calibrations 4, 5 et 6. Les temps de résidence moyens sont de 85,0 min, 80,0 min et 92,0 min. Ces temps correspondent à ceux obtenus pour le premier type de boue.



**Figure 6.23 – Reproductibilité des courbes  $E(t)$ , boue # 2**

Les courbes  $E(Z)$  sont présentées à la Figure 6.24. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont respectivement de 0,66, 0,62 et 0,67 pour les calibrations 4, 5 et 6. Ces valeurs correspondent à celles obtenues pour le premier type de boue. L'écart-type moyen obtenu est de 0,16 (la barre d'erreur représente le double de l'écart-type moyen) et une erreur moyenne de 7,1 %. Une analyse par la méthode de décomposition des courbes est effectuée afin de confirmer si les zones d'écoulement de la boue dans le décanteur sont les mêmes. Les Tableaux 6.6, 6.7 et 6.6 présentent les paramètres de décomposition de chacune des zones.





**Figure 6.24 – Reproductibilité des courbes  $E(Z)$ , boue # 2**

Ces courbes  $E(Z)$  sont également décomposées en cinq pics. Le nombre  $N$  de CSTR utilisé pour calculer ces cinq pics sont similaires à ceux obtenus pour le premier type de boue. La position de ces pics est lui aussi approximativement similaire. Les principales différences proviennent surtout des pics 4 et 5. En effet, on observe plus de variation dans ces pics, surtout au niveau de l'aire spécifique. Par exemple, lors de l'essai de calibration 5, l'importance des pics 4 et 5 est similaire alors que pour les deux autres essais de calibration le cinquième pic l'emporte sur le quatrième. Néanmoins, les comportements observés sont essentiellement les mêmes. Cependant, la présence de variations plus importantes dans certaines portions de l'écoulement indique que l'opération avec le second type de boue est

plus difficile à maintenir à l'état d'équilibre. Mentionnons également que l'essai de calibration 6 a été effectué avec le même type de polymère mais provenant d'un nouveau lot. Cet essai est le seul à avoir été réalisé avec ce polymère.

En somme, les mesures expérimentales et les courbes de calibration sont suffisamment reproductibles pour permettre d'effectuer une analyse du comportement et du déplacement de la boue rouge dans un décanteur. Le type de boue influence légèrement la forme des courbes de RTD sans cependant affecter les décompositions des pics principaux (pic 1, 2, et 3). Les informations les moins précises proviennent des pics 4 et 5. Par conséquent, il est important de tenir compte de cette imprécision dans l'analyse des courbes RTD.

| N             | Calibration 4 | Calibration 5 | Calibration 6 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Premier pic   | 6             | 6             | 7             |
| Deuxième pic  | 4             | 4             | 4             |
| Troisième pic | 3             | 3             | 3             |
| Quatrième pic | 18            | 18            | 20            |
| Cinquième pic | 3             | 3             | 3             |

**Tableau 6.6 – Nombre de CSTR utilisés pour simuler l'écoulement, boue # 2**

| $Z_{\text{moyen}}$ | Calibration 4 | Calibration 5 | Calibration 6 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| Premier pic        | 0,47          | 0,49          | 0,45          |
| Deuxième pic       | 0,60          | 0,62          | 0,57          |
| Troisième pic      | 0,83          | 0,84          | 0,75          |
| Quatrième pic      | 0,35          | 0,36          | 0,34          |
| Cinquième pic      | 1,11          | 1,02          | 0,97          |

Tableau 6.7 –  $Z_{\text{moyen}}$  spécifique de chacun des pics, boue # 2

| Aire (%)      | Calibration 4 | Calibration 5 | Calibration 6 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Premier pic   | 40,4          | 43,8          | 37,3          |
| Deuxième pic  | 24,0          | 22,0          | 19,7          |
| Troisième pic | 14,7          | 12,0          | 11,5          |
| Quatrième pic | 3,6           | 8,7           | 3,9           |
| Cinquième pic | 15,2          | 10,5          | 19,6          |

Tableau 6.8 – Aire spécifique de chacun des pics, boue # 2

#### 6.4 Variables influençant la RTD

Les résultats présentés dans cette section permettent de compléter la validation de la méthode de décomposition. Ainsi, différents types d'injection sont effectués afin de compléter l'étude du comportement et du déplacement de la boue dans un décanteur. Les paramètres d'opération sont constants pour cette portion des essais, à moins d'avis contraire. Les paramètres utilisés sont ceux établis pour les essais de calibration.



### ***6.4.1 Flocculation de la poudre de fer***

Il est possible d'obtenir la trace globale de l'écoulement en introduisant le traceur de fer dans la ligne d'alimentation. Cette dernière est séparée en deux parties par le point d'injection de flocculant. Par conséquent, il est important de vérifier si la trace obtenue est influencée par l'emplacement de l'injection de fer (avant ou après la flocculation de la boue). Au cours des précédents essais de calibration, le traceur de fer était injecté avant le flocculant. Ainsi, le fer est mélangé à la suspension puis flocculé avec des particules de boue avant d'être introduit dans le décanteur (le fer fait partie des agrégats). Dans la situation opposée, le fer est ajouté à une suspension formée d'agrégats de petites tailles. Il est donc possible que les particules de fer n'aient pas le temps de s'agglomérer aux agrégats et il peut en résulter une signature différente. Par conséquent, il est important de valider cette information puisque lors d'essais en usine, les points d'injection du traceur ne seront pas nécessairement toujours aux mêmes endroits.

La Figure 6.25 présente la comparaison des courbes  $E(Z)$  pour une injection de fer avant et après la flocculation. Une analyse visuelle permet d'établir que les deux courbes sont similaires. Dans la descente de la courbe du fer non-flocculé, on observe cependant des oscillations. Ces dernières sont causées par des vibrations subies par l'appareil de mesures et ne doivent pas être interprétées. Les valeurs des  $Z_{\text{moyen}}$  sont de 0,65 pour le fer flocculé et de 0,63 pour le fer non-flocculé. Les temps de résidence moyens sont de 89,0 min. Le taux de recouvrement du fer pour cet essai est de 91,1 %. Le couple s'est stabilisé avec une valeur arbitraire de 200. Les paramètres de décomposition sont présentés dans le Tableau

6.9. Les deux décompositions sont approximativement les mêmes. L'injection du fer avant ou après la floculation de la boue n'a donc pas d'incidence majeure sur la trace obtenue.

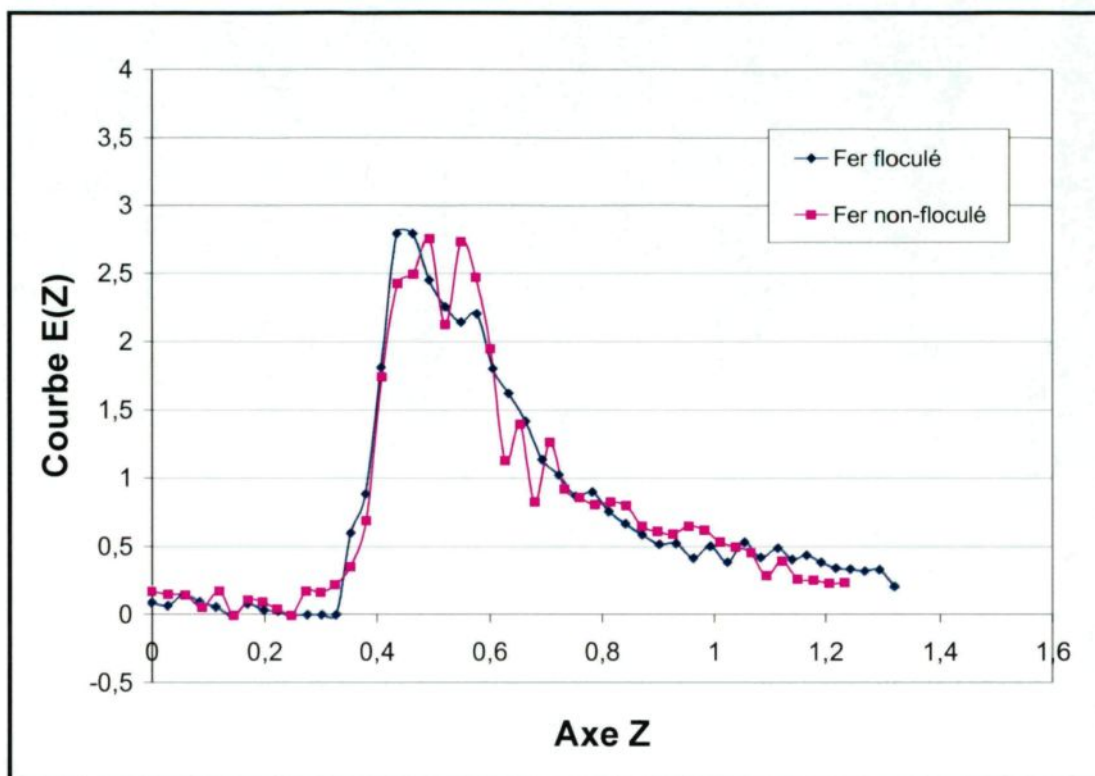


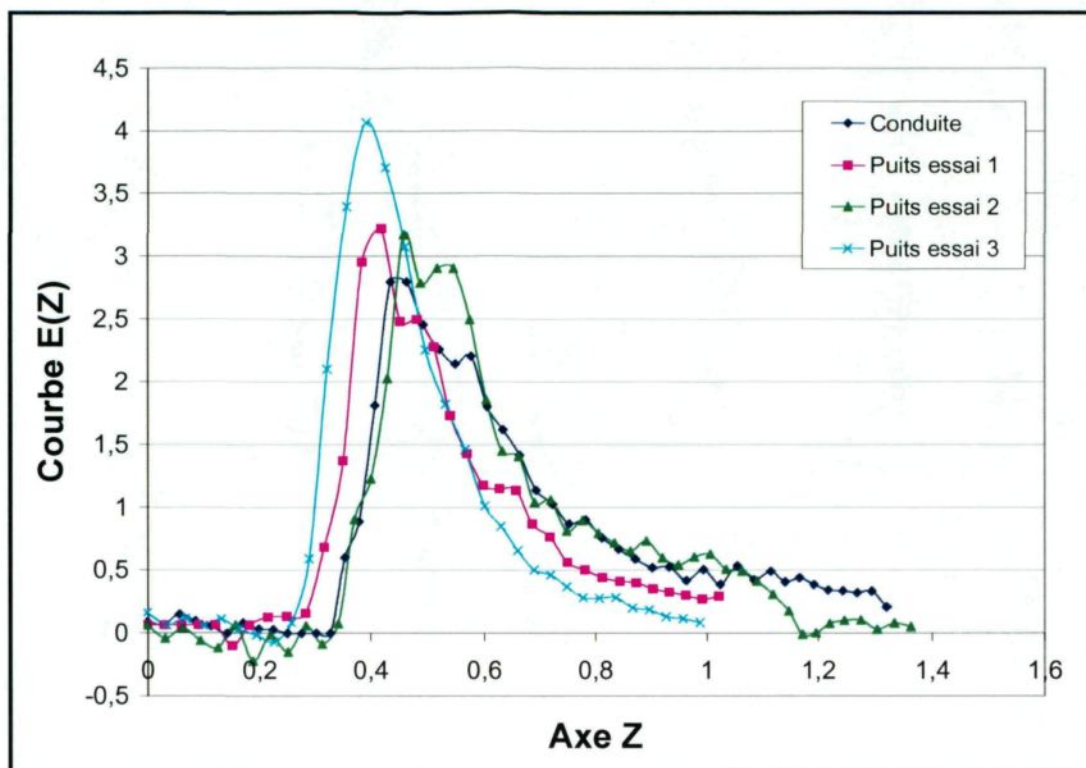
Figure 6.25 – Influence de la floculation du fer sur l'écoulement global

|                |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|----------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fer floclé     | N                  | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|                | Z <sub>moyen</sub> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|                | Aires              | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| Fer non-floclé | N                  | 6       | 4       | 3       | 14      | 3       |
|                | Z <sub>moyen</sub> | 0,49    | 0,61    | 0,83    | 0,36    | 1,08    |
|                | Aires              | 43,2    | 20,4    | 17,0    | 1,8     | 10,9    |

Tableau 6.9 – Paramètres de décomposition des courbes de floculation du fer

#### **6.4.2 Type de puits d'alimentation**

Deux puits d'alimentation ont été utilisés au cours des essais expérimentaux : un sous forme de système de tuyauterie ou conduite et un autre de type cylindrique et creux. Le puits d'alimentation sous forme de cylindre creux est celui qui est généralement utilisé en industrie. L'alimentation sous forme de conduite a été utilisée lors des essais de calibration. La Figure 6.26 présente la RTD obtenue pour trois essais effectués à l'aide du puits d'alimentation. Les paramètres d'opération sont les mêmes pour chacun des essais. Tel qu'observé, les courbes sont très peu reproductibles. En effet, au cours de ces essais, il était difficile de maintenir le système dans un état d'équilibre. En fait, les mouvements des agrégats qui quittent le puits d'alimentation sont restreints par la paroi du puits. Les agrégats ont tendance à tomber directement sous le puits et à s'y amonceler. Il se forme ainsi une importante dénivellation à la surface du lit (partie la plus élevée sous le puits) qui induit des signatures de RTD différentes. Malheureusement, d'un essai à l'autre, il est difficile de maîtriser ce phénomène de dénivellation dans le décanteur expérimental. Par conséquent, les traces obtenues sont moins reproductibles. Une solution possible consisterait à augmenter la colonne de liqueur entre la sortie du puits et la surface du lit. Cette option n'a pas été testée car les volumes de liqueur supplémentaires limiteraient davantage le nombre d'essais à réaliser. À l'inverse, le débit à la sortie et la courbure de la conduite entraînent les agrégats dans un léger mouvement de rotation, provoquant ainsi une meilleure répartition à la surface du lit (surface uniforme du lit de boue) et un meilleur contrôle des paramètres opératoires. Conséquemment, la conduite est plus utile pour évaluer l'écoulement et le déplacement de la boue dans le décanteur à échelle réduite.



**Figure 6.26 – Reproductibilité des courbes  $E(Z)$  utilisant un puits d'alimentation**

Une seule des courbes réalisées avec un puits d'alimentation (Puits essai 2) est similaire à celle obtenue par la conduite. Autrement dit, le puits d'alimentation cylindrique et la conduite ont généré des conditions d'écoulement de boue similaire. Une analyse de décomposition des pics effectuée sur la courbe « Puits essai 2 » démontre la présence des mêmes zones d'écoulement et de dimensions similaires à l'exception de celle associée au pic 5 qui est quasiment absente. Cette zone d'écoulement est associée à la zone d'écoulement près de la paroi et à la dispersion du traceur à travers les volumes de boues. La diminution de cette zone indique que la dispersion du traceur de fer est moindre.

### 6.4.3 Hauteur de l'alimentation

La hauteur du puits ou conduite d'alimentation a une incidence sur la dispersion des agrégats à la surface du lit. Théoriquement, plus l'alimentation est haute, plus grande est la dispersion à la surface du lit. Un essai de traçage a été réalisé avec les paramètres d'opération standards mais où la distance entre la surface du lit et le puits d'alimentation est doublée. La Figure 6.27 présente la courbe de traçage obtenue versus la courbe de calibration standard.

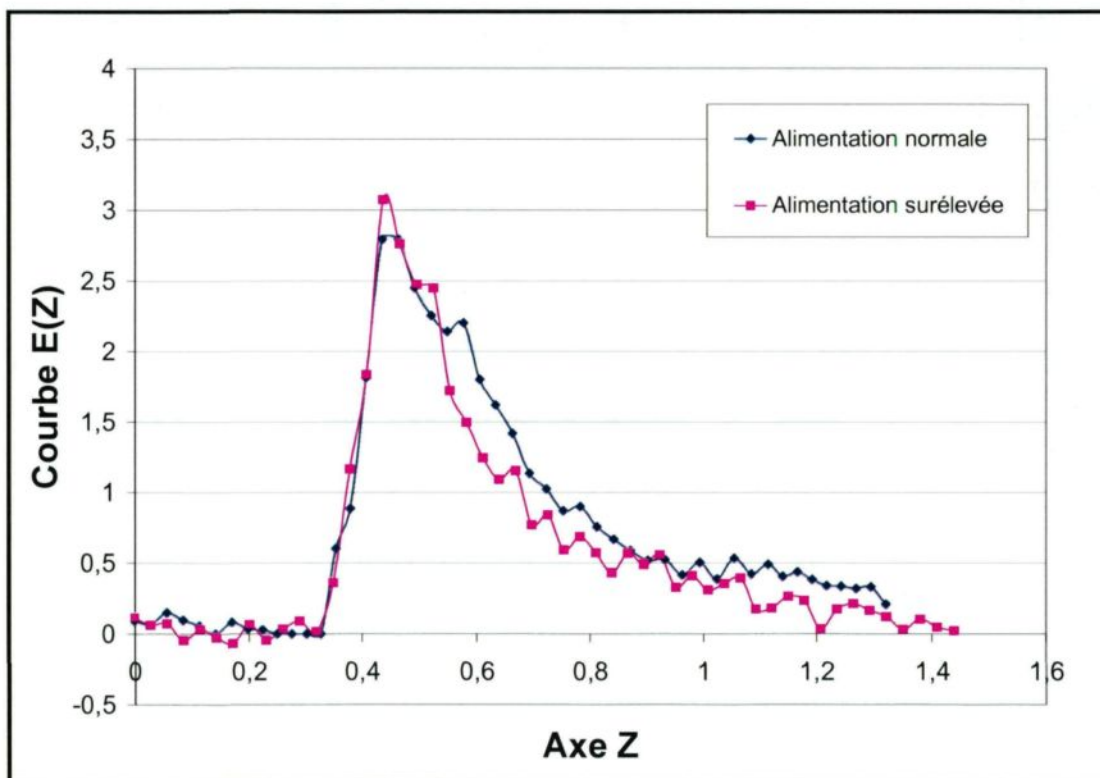


Figure 6.27 – Influence de la hauteur de l'alimentation

La courbe avec alimentation surélevée est similaire à celle avec alimentation normale (présence du même délai, 2 pics majeurs et une traînée), mais le temps de



résidence moyen  $y$  est légèrement plus court ( $\tau = 82,0$  min et  $Z_{\text{moyen}} = 0,63$ ). En effet, la fraction solide à la sousverse est moins concentrée (51,0 % p/p versus 53,1 % p/p) et le débit de sousverse est plus élevé (333 mL/min versus 308 mL/min). Par conséquent, le temps nécessaire pour évacuer le même volume de boue est moindre. La valeur du couple stabilisé est également moindre (180 versus 200). Le taux de recouvrement du traceur de fer est de 87,1 %. Les paramètres de décomposition en pics sont présentés dans le Tableau 6.10. À l'exception du quatrième pic, tous les autres pics ont un  $Z_{\text{moyen}}$  plus court. Les variations sont cependant très faibles. Aucune autre différence n'a été observée.

|                        |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Alimentation normale   | N                  | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|                        | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|                        | Aire               | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| Alimentation surélevée | N                  | 7       | 4       | 3       | 18      | 3       |
|                        | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,47    | 0,59    | 0,80    | 0,37    | 1,03    |
|                        | Aire               | 44,0    | 27,8    | 17,5    | 2,1     | 7,5     |

**Tableau 6.10 – Paramètres de décomposition des courbes de hauteur de l'alimentation**

En somme, la hauteur de l'alimentation ne semble pas avoir d'incidence significative sur la trace obtenue puisque les mêmes pics de décomposition ont été obtenus. L'écart entre la courbe d'alimentation normale et surélevée semble principalement provenir d'une variation de la fraction solide à la sousverse. Bien évidemment, le décanteur expérimental n'est peut-être pas suffisamment large et haut pour observer le phénomène.

#### 6.4.4 Emplacement de l'alimentation

L'emplacement du puits d'alimentation peut avoir une incidence sur la distribution des agrégats à l'intérieur du décanteur. En effet, il a été observé (section 6.4.2) que l'accumulation d'agrégats dans une zone spécifique pouvait modifier l'apparence des courbes RTD. En industrie, les puits d'alimentation sont généralement centrés ou près de l'arbre de rotation du râteau du décanteur. Dans tous les essais réalisés jusqu'à maintenant, le puits ou la conduite était localisé à  $0,5 r$ . La Figure 6.28 présente les courbes de  $E(Z)$  obtenues pour 3 positions de l'alimentation : près du centre ( $r = 0$ ), à mi-parcours ( $r = 0,5 r$ ) et près de la paroi ( $r = r$ ).

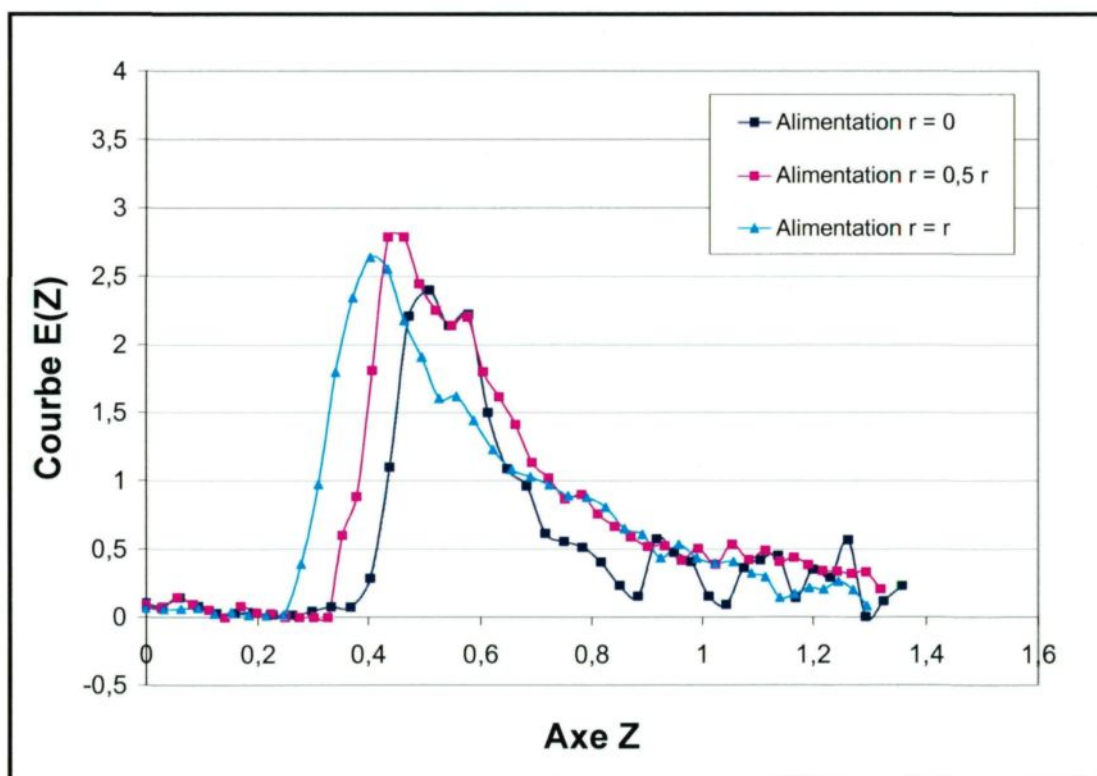


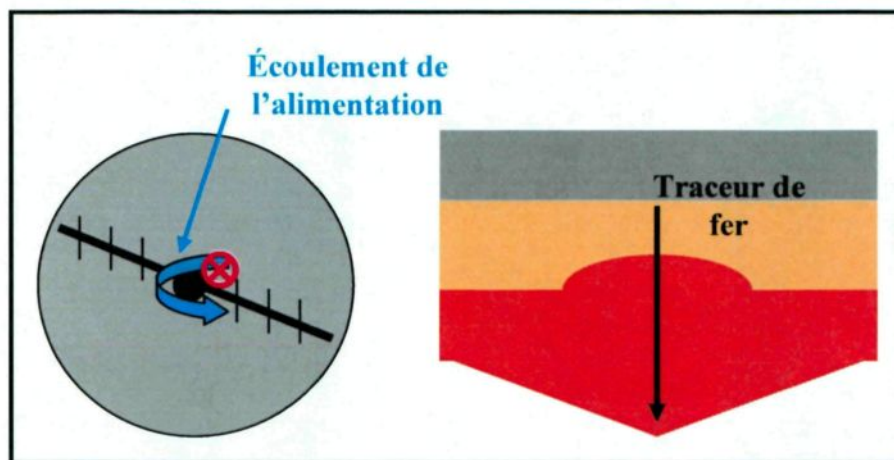
Figure 6.28 – Courbes  $E(Z)$  pour des variations d'emplacements de l'alimentation

Les quantités de traceur de fer retrouvées sont respectivement de 71,5 %, 97,0 % et 93,1 % pour les courbes d'alimentation à  $r = 0$ ,  $r = 0,5 r$  et  $r = r$ . Les mesures expérimentales obtenues pour chacun des essais sont similaires mais les écarts-types moyens des essais à  $r = 0$  et  $r = r$  sont plus grands. Une plus grande variabilité de l'écart-type indique qu'il est plus difficile de maintenir la stabilité du processus de séparation solide/liquide. Les valeurs des  $Z_{\text{moyen}}$  des courbes sont de 0,68, 0,65 et 0,60.

#### **6.4.4.1 Alimentation près du centre**

Tel que spécifié précédemment, le puits d'alimentation utilisé est du type conduite dont l'extrémité est légèrement recourbée afin de ralentir la vitesse de sortie des agrégats. Cette courbure entraîne un léger mouvement de rotation des agrégats sous forme de spirale concentrique. Lorsque l'alimentation est située près du centre, la plupart des agrégats s'accumulent dans la zone centrale du décanteur dû à l'effet de courbure de la conduite. Cette accumulation favorise l'apparition d'une dénivellation au centre (voir Figure 6.29). La dénivellation est de l'ordre de 2,0 à 3,0 cm entre le centre et les parois. Lors de l'injection de fer via l'alimentation, la majeure partie de celui-ci se dépose donc dans la partie centrale. On observe que la courbe  $E(Z)$  de l'alimentation centrée à  $r = 0$  est décalée par rapport à une alimentation normale à  $0,5 r$ . Ce décalage peut s'expliquer par la quantité de boue supplémentaire que le traceur doit traverser pour arriver à la sousverse. Donc, le délai de la courbe est plus grand.





**Figure 6.29 – Influence de l'alimentation près du centre**

Une analyse par la méthode de décomposition en pics indique que la courbe d'alimentation à  $r = 0$  est principalement composée d'un pic de  $Z_{\text{moyen}} = 0,53$  (pic associé à la portion d'écoulement de la boue au centre du décanteur). Les autres pics sont plus petits et simulent cinq bosses d'amplitude décroissante (Tableau 6.11). Ces pics possèdent des comportements d'écoulement différents de ceux habituellement analysés. Ils sont possiblement attribuables aux structures du râteau. En effet, lors du cheminement du fer dans la section centrale du décanteur, les probabilités pour qu'il se dépose sur les structures du râteau est grande. Lorsque la masse de matériel accumulée sur les structures est suffisamment importante, la masse peut alors s'écouler vers la sousverse créant ainsi, l'apparition des petits pics dans la RTD.

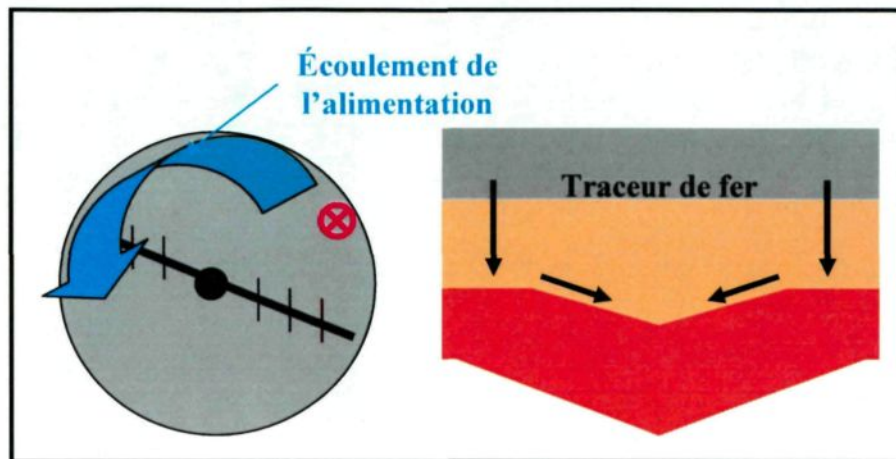
|   |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 | Pic # 6 |
|---|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Alimentation</b><br><b>r = 0</b>     | <b>N</b>                 | 6       | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
|   | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,53    | 0,64    | 0,81    | 0,96    | 1,13    | 1,25    |
|   | <b>Aire</b>              | 51,2    | 16,6    | 7,5     | 7,2     | 6,8     | 5,4     |
| <b>Alimentation</b><br><b>r = 0,5 r</b> | <b>N</b>                 | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       | --      |
|   | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    | --      |
|   | <b>Aire</b>              | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     | --      |
| <b>Alimentation</b><br><b>r = r</b>     | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | --      | 3       | --      |
|   | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,45    | 0,67    | 0,91    | --      | 1,16    | --      |
|   | <b>Aire</b>              | 57,2    | 18,1    | 17,5    | --      | 4,5     | --      |

**Tableau 6.11 – Paramètres de décomposition des courbes d’emplacement de l’alimentation**

#### **6.4.4.2 Alimentation près de la paroi**

Lorsque l’alimentation est localisée à  $r = r$ , les agrégats sont amenés à se disperser sur une plus grande surface du lit. De façon générale, les agrégats tendent à se déposer sur les pourtours du décanteur (zone située entre  $0,5 r$  et  $r$ ). Ainsi, à l’opposé de la situation précédente, il se forme une cavité au centre du décanteur favorisant le passage de la boue (Figure 6.30). Cette dénivellation est de moindre importance et est de l’ordre de 1,0 à 2,0 cm. Lorsque le fer est introduit via l’alimentation, celui-ci se dépose sur les zones à  $0,5 r$  et  $r$  et une portion est entraînée avec la boue par écoulement vers le centre du décanteur. Par conséquent, cette portion du traceur de fer va apparaître plus rapidement diminuant ainsi la longueur du délai entre l’origine et le début de la courbe (Figure 6.28). La portion du

traceur qui demeure dans la zone de  $0,5 r$  et  $r$  adopte le même comportement d'écoulement que celui observé lors des essais de calibration. Les paramètres de décomposition sont présentés au Tableau 6.11. Notons que le pic associé au court-circuit de l'écoulement n'est pas présent dans cette configuration du lit de boue.

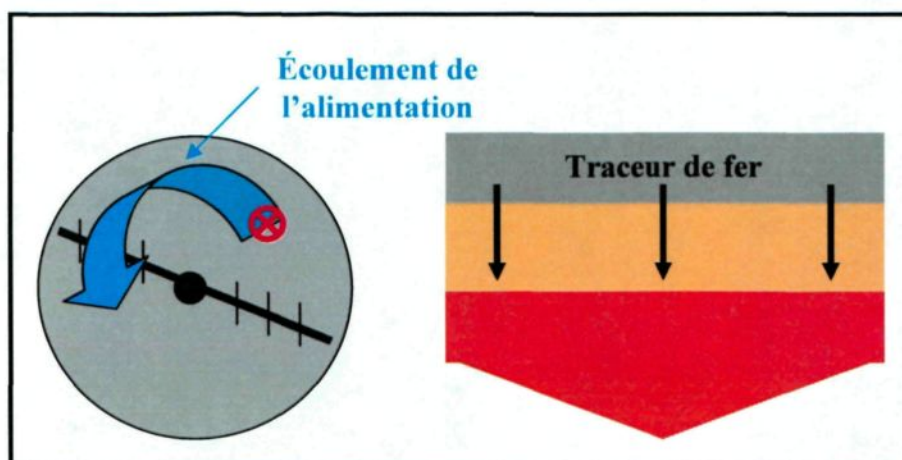


**Figure 6.30 – Influence de l'alimentation près de la paroi**

#### **6.4.4.3 Alimentation près de la zone milieu (à mi-rayon)**

Lorsque l'alimentation est située à  $0,5 r$ , les agrégats sont plus ou moins répartis sur toutes les zones (Figure 6.31). Conséquemment, le lit formé ne possède pas de dénivellation. La poudre de fer, lorsqu'injectée via l'alimentation, est elle aussi mieux répartie sur la surface du lit. L'alimentation à  $0,5 r$  permet donc d'observer la signature de toutes les zones d'écoulement.





**Figure 6.31 – Influence de l'alimentation à mi-parcours**

#### **6.4.4.4 Alimentation près de la zone milieu (à mi-rayon) à 180°**

Il a été observé que l'emplacement de l'alimentation influence la structure du lit de boue ainsi que l'écoulement. Lorsque l'alimentation est localisée à  $0,5 r$ , la formation du lit de boue semble uniforme. Pour cet essai, l'alimentation est localisée à  $0,5 r$  mais à 180 degrés de sa position initiale afin de vérifier si le comportement d'écoulement est le même des deux côtés du décanteur. La Figure 6.32 présente les deux courbes obtenues. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont de 0,65 et 0,62. Le taux de recouvrement du traceur de fer est de 88,4 % pour l'alimentation à 180° et 97,0 % pour l'alimentation à  $0,5 r$ . Les paramètres de décomposition sont présentés au Tableau 6.12. Les deux courbes expérimentales sont presque identiques. De légères variations d'aire des pics 1 sont cependant observées (40,5 % versus 44,9 %). Ces variations indiquent que les proportions de matériels traités par ces zones diffèrent. Néanmoins, ces variations sont minimales et ne peuvent être utilisées afin de différencier les deux courbes. En somme, les traces obtenues pour un emplacement

de  $0,5 r$  sont les mêmes sur toute la circonférence du décanteur. Cette observation est également valide pour les autres emplacements de l'alimentation.

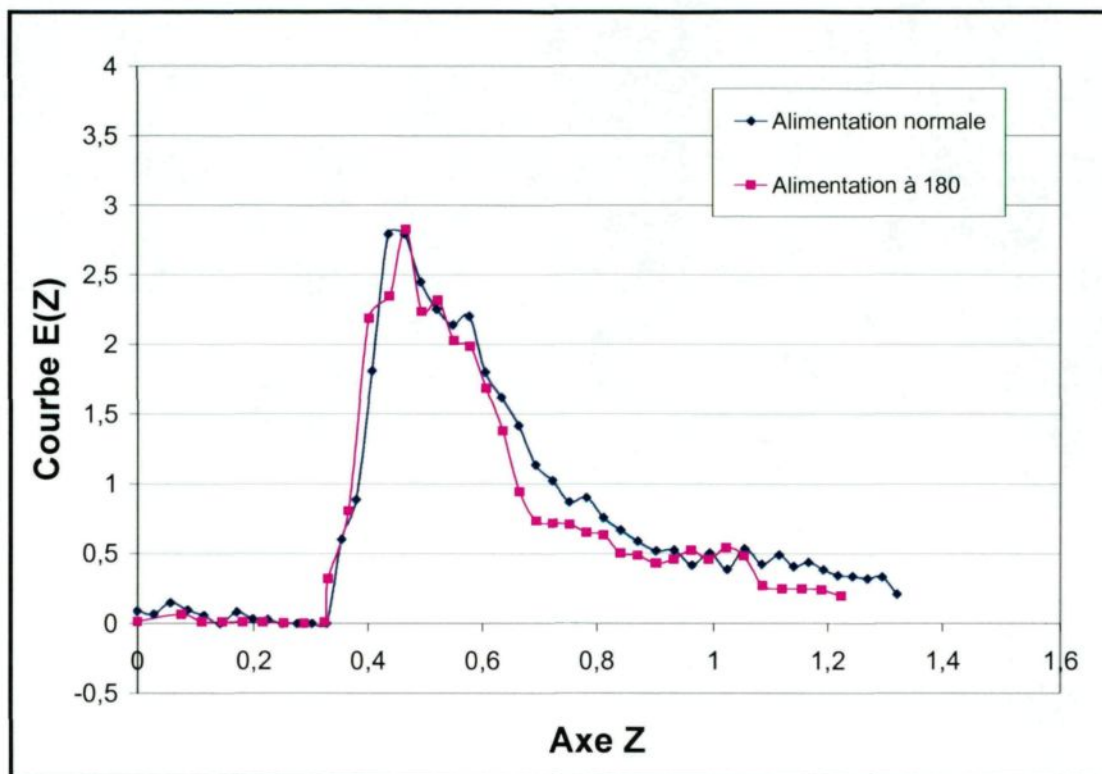


Figure 6.32 – Courbes  $E(Z)$  pour une alimentation à  $0,5 r$  à  $180^\circ$

|  |      | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|--|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Alimentation<br>$r = 0,5 r$                  | N    | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|  | RTD  | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|  | Aire | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| Alimentation<br>$r = 0,5 r$<br>à $180^\circ$ | N    | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       |
|  | RTD  | 0,47    | 0,62    | 0,89    | 0,38    | 1,16    |
|  | Aire | 44,9    | 23,6    | 18,7    | 2,0     | 7,5     |

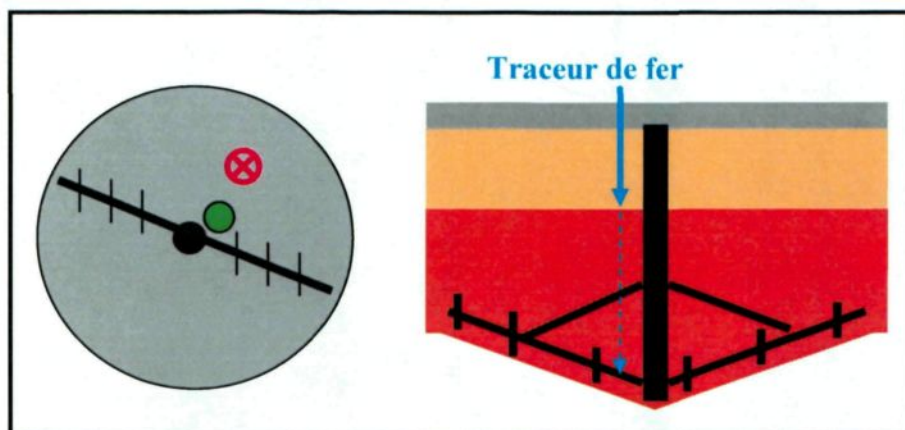
Tableau 6.12 – Paramètres de décomposition des courbes d'alimentation à  $0,5 r$

### **6.4.5 Injections localisées**

Des injections localisées de traceur de fer sont effectuées afin d'étudier le comportement d'écoulement de la boue dans des zones spécifiques. Ces injections permettent donc de confirmer l'interprétation des zones d'écoulement identifiées à l'aide de la méthode de décomposition. Pour effectuer une injection localisée, le traceur de fer est préalablement mélangé à la suspension solide de la sousverse et introduit dans une seringue. À l'aide d'une perche spéciale, la suspension concentrée en traceur est déposée sur la surface du lit. Malgré l'utilisation d'une seringue, le dépôt s'étale sur quelques centimètres. Conséquemment, il est possible que certaines injections localisées contiennent un peu d'informations sur les autres zones. Trois zones d'écoulement sont à l'étude : près du centre ( $r = 0$ ), à mi-rayon ( $r = 0,5 r$ ) et près de la paroi ( $r = r$ ).

#### **6.4.5.1 Injections localisées au centre ( $r = 0$ )**

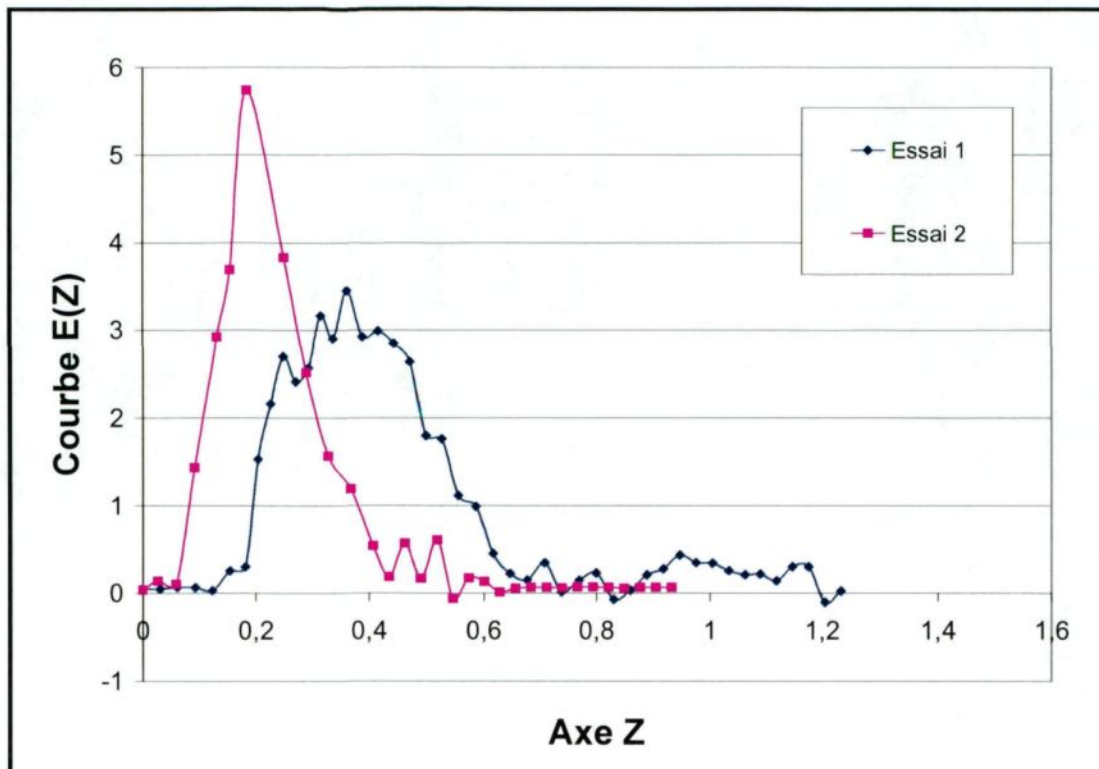
Selon la méthode de décomposition des courbes, la zone centrale du décanteur est très active. Théoriquement, la trace obtenue pour cette zone devrait être similaire à celle obtenue par la décomposition du premier pic des courbes de calibration. Le traceur de fer est déposé directement à côté de l'arbre de rotation du râteau (point vert), du même côté que l'alimentation (point rouge). La projection de la trajectoire du traceur est illustrée à l'aide de pointillés à la Figure 6.33.



**Figure 6.33 – Injection localisée au centre du décanteur**

La Figure 6.34 présente deux traces obtenues lors d'injections localisées à  $r = 0$ . Les quantités de fer injectées sont de 48,31 g pour l'essai 1 et 50,11 g pour l'essai 2. La quantité de traceur injectée en un seul point est la même que celle utilisée pour obtenir une trace d'écoulement générale. Conséquemment, l'amplitude des courbes est beaucoup plus élevée. Les paramètres d'opération sont conformes à ceux établis lors des essais de calibration. Première constatation, le délai entre l'origine et le début de la trace est beaucoup moins grand. En effet, il a été stipulé que le délai est principalement associé au passage de la boue dans la portion cylindrique du décanteur (au-dessus des râteaux) sous forme d'écoulement PFR. Lors d'injections localisées, la poudre de fer est mélangée à de la boue de sousverse. Par conséquent, lorsque celle-ci est déposée à la surface du lit, elle s'enfonce rapidement pour rejoindre une boue de densité similaire. Autrement dit, le traceur de fer voyage avec la boue plus concentrée pour atteindre le cône du décanteur en court-circuitant l'écoulement PFR. Pour comparer les courbes de calibration et les courbes d'injection localisée, on doit donc soustraire l'écoulement PFR de la courbe d'écoulement global.





**Figure 6.34 – Courbes  $E(Z)$  pour des injections localisées à  $r = 0$**

Les deux courbes obtenues sont très peu similaires. En effet, lors de l'injection du traceur, on doit s'assurer que le râteau n'est pas directement sous le point d'injection. Dans le cas de l'essai 1, le parcours du fer a été retardé par les structures des râteaux. Autrement dit, le traceur s'est d'abord déposé sur les structures créant ainsi un délai dans l'écoulement. De plus, l'écoulement du traceur représenté par la forme de la courbe est également modifié par l'interférence. Le problème d'interférences avec les structures du râteau est principalement présent pour les injections localisées à  $r = 0$  puisqu'il y a plus de structures à cet endroit.



La forme et l'emplacement de la courbe de l'essai 2 sont plus représentatifs d'un écoulement au centre du décanteur. Le temps de résidence moyen est de 27,0 min et la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  de 0,25. L'analyse de cette courbe avec la méthode de décomposition indique que la courbe est principalement constituée d'un seul pic (Tableau 6.13). Le pic est composé de 11 CSTR en série, représentant ainsi un écoulement similaire à un PFR. Autrement dit, la boue qui circule dans cette section est très peu affectée ou « mélangée » par le râteau. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  du premier pic de décomposition (0,21) est inférieure à celle obtenue pour les essais de calibration (0,48). En effet, la courbe d'écoulement globale doit être décalée pour comparer les courbes de décomposition. La Figure 6.35 présente le décalage existant entre les deux courbes.

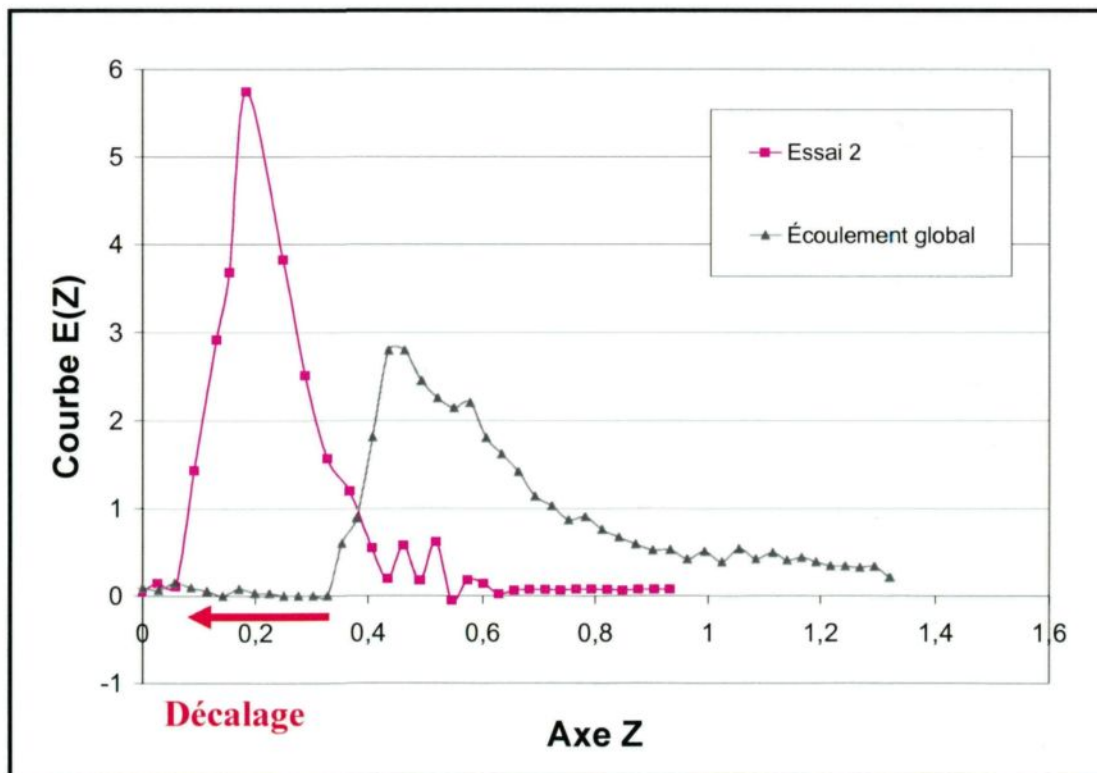


Figure 6.35 – Décalage de la courbe d'écoulement global

Selon l'hypothèse initiale, la valeur de l'écoulement PFR dans la portion cylindrique du décanteur est de  $Z = 0,32 \approx 45,0$  minutes. En soustrayant cette valeur de la courbe d'écoulement global ( $Z$  de l'écoulement global  $- 0,32$ ), on observe que le premier pic devrait débiter à  $Z = 0$  (section 6.2.3.2). La valeur du délai initial avant le premier pic de décomposition de la courbe de l'essai 2 est de  $Z = 0,06$  ( $\sim 7,0$  min selon la courbe  $E(t)$ ). Ce délai représente la quantité minimale de matériel devant être évacuée avant de détecter le traceur. Autrement dit, cette valeur correspond au « temps minimal » pris par le traceur pour traverser le cône. Une schématisation de l'écoulement est présentée à la Figure 6.36. La différence de délai doit également être soustraite de la courbe de l'essai 2 ( $Z$  de l'injection localisée à  $r = 0 - 0,06$ ) afin de faciliter la comparaison des décompositions des courbes (Figure 6.37). Ainsi, le premier pic de l'injection localisée à  $r = 0$  ( $0,21 - 0,06 = 0,15$ ) correspond alors au pic 1 de l'écoulement global ( $0,48 - 0,32 = 0,16$ ). Cette observation tend à supporter l'hypothèse initialement émise.

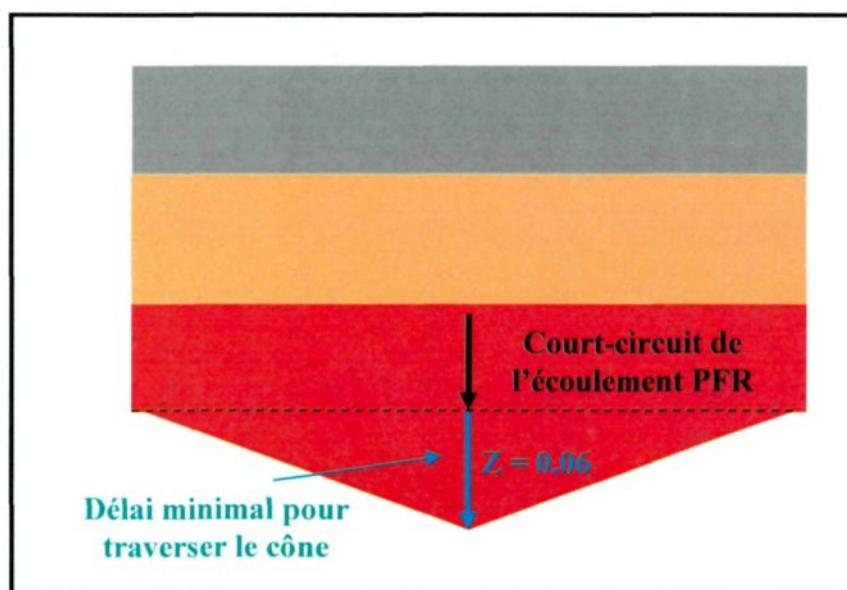


Figure 6.36 – Écoulement de la boue dans la portion conique du décanteur à  $r = 0$

|                               |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|-------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Écoulement global             | N                  | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|                               | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|                               | Aire               | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| Injection localisée à $r = 0$ | N                  | 11      | 3       | --      | 14      | --      |
|                               | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,21    | 0,37    | --      | 0,11    | --      |
|                               | Aire               | 72,6    | 13,7    | --      | 6,6     | --      |

Tableau 6.13 – Paramètres de décomposition des courbes d'injection localisée à  $r = 0$

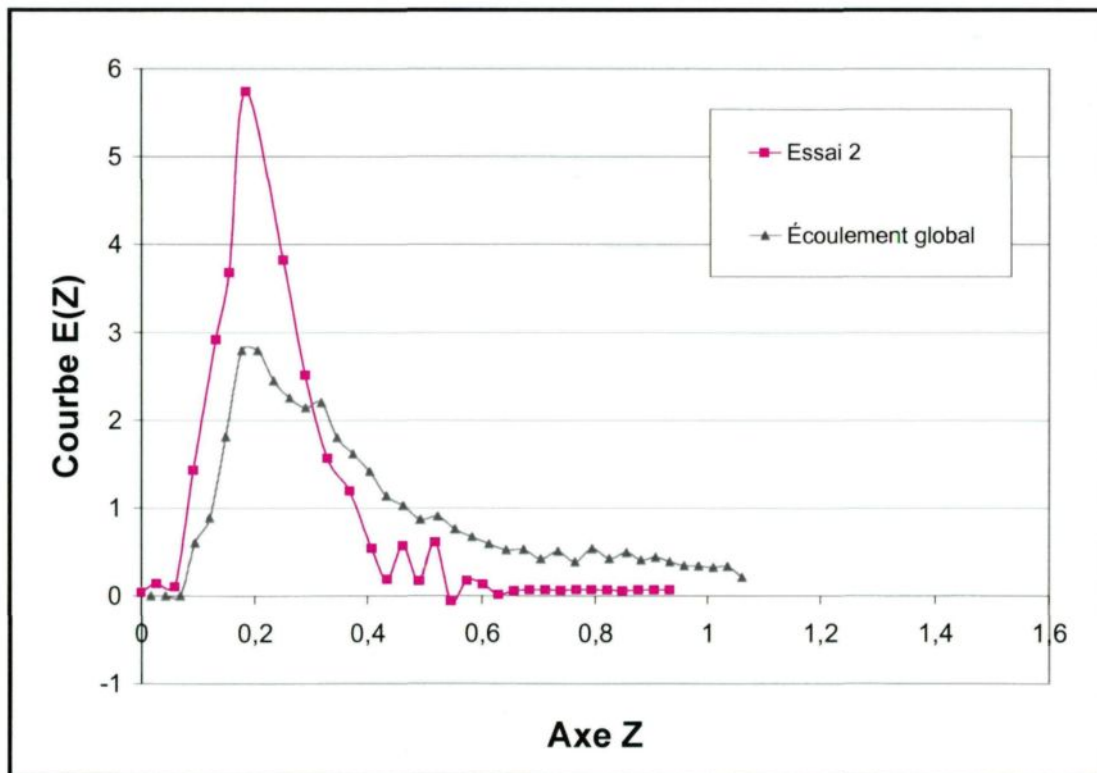


Figure 6.37 – Exemple de décalage des courbes pour comparer les premiers pics de décomposition



En somme, l'injection localisée à  $r = 0$  correspond principalement au premier pic de décomposition de l'écoulement global. Le nombre (N) de CSTR utilisé est cependant plus grand (11 versus 6). Conséquemment, l'écoulement dans cette portion du décanteur est plus similaire à un écoulement piston avec une légère dispersion. La dispersion provient probablement de la zone de mélange au centre du décanteur. On observe des petits pics à la fin de la trace de l'essai 2. Ces petits pics n'ont pas été décomposés mais ressemblent à une signature de recirculation. Cette dernière pourrait être associée au phénomène de recirculation existant sur les râteliers dont les lames ont la même taille (Annexe B).

#### 6.4.5.2 Injections localisées à mi-rayon ( $r = 0,5 r$ )

Selon l'hypothèse précédemment émise, la courbe obtenue pour une injection localisée à  $0,5 r$  devrait ressembler au second pic de décomposition de l'écoulement global. Les mêmes paramètres opératoires ont été utilisés pour réaliser les essais. La trajectoire supposée du traceur de fer dans le décanteur est illustrée à la figure suivante.

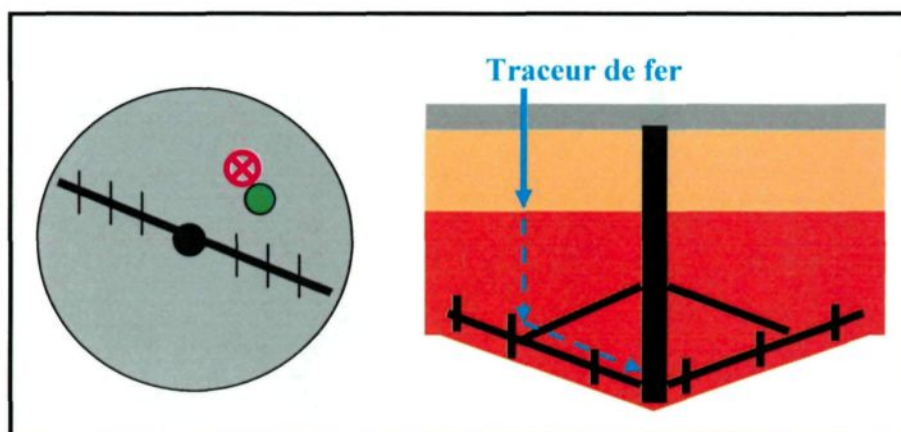
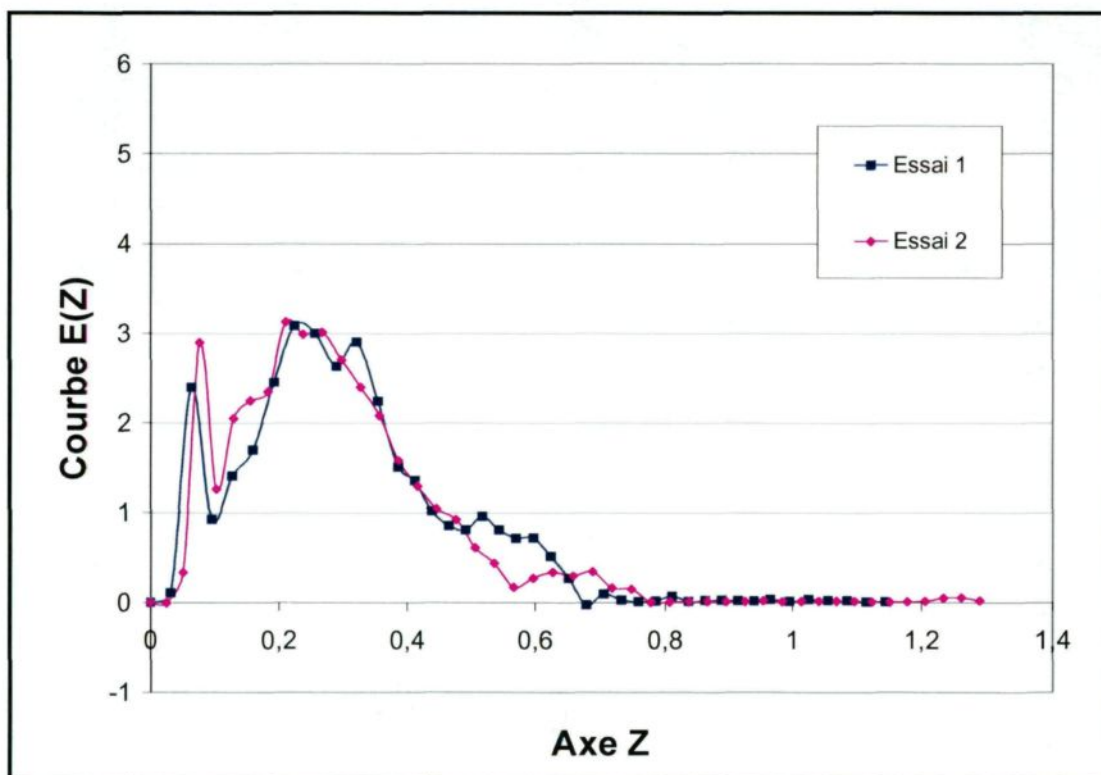


Figure 6.38 – Injection localisée à  $r = 0,5 r$

La Figure 6.39 présente les courbes  $E(Z)$  obtenues pour deux essais d'injection localisées à  $0,5 r$ . Le taux de recouvrement du traceur après l'expérimentation est de 99,1 % pour l'essai 1 et 99,4 % pour l'essai 2. On observe que les deux courbes obtenues sont similaires et que la reproductibilité est suffisamment bonne. Encore une fois, le délai associé au passage du traceur dans la portion de l'écoulement piston est court-circuité. La valeur du temps de résidence moyen est de 34,2 min pour l'essai 1 et 43,0 min pour l'essai 2. Les valeurs associées de  $Z_{\text{moyen}}$  sont de 0,30 et 0,29.



**Figure 6.39 – Courbes  $E(Z)$  pour des injections localisées à  $r = 0,5 r$**

L'analyse de ces courbes  $E(Z)$  s'avère plus complexe que pour une injection localisée à  $r = 0$ . En effet, on observe que les courbes sont constituées d'une somme de

plusieurs écoulements. Autrement dit, il est possible que des informations relatives à d'autres zones d'écoulement soient également représentées sur ces courbes, dû à l'étalement du point d'injection. Une analyse visuelle indique qu'il y a un court-circuit assez important dans cette zone. La seconde portion de la courbe est constituée de 2 autres pics et d'une légère traînée. Les paramètres de décomposition des courbes sont présentés au Tableau 6.14. L'écoulement est décomposé en quatre principaux pics. On constate qu'une petite portion ( $\sim 20\%$ ) des courbes représente l'écoulement associé au pic 1. Le second pic est celui majoritairement représenté par la décomposition (50,2 % et 46,7 %). Le troisième pic, quant à lui, représente le traceur résiduel dilué lors du passage dans le râteau (diffusion du traceur dans la boue à partir de la zone de 0,5 r).

|  |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|--|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Écoulement global</b>                           | <b>N</b>                 | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|  | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|  | <b>Aire</b>              | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| <b>Injection localisée à r = 0,5 r<br/>Essai 1</b> | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | 19      | --      |
|  | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,18    | 0,31    | 0,59    | 0,07    | --      |
|  | <b>Aire</b>              | 21,5    | 50,2    | 13,3    | 9,6     | --      |
| <b>Injection localisée à r = 0,5 r<br/>Essai 2</b> | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | 19      | --      |
|  | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,17    | 0,29    | 0,48    | 0,09    | --      |
|  | <b>Aire</b>              | 20,1    | 46,7    | 15,7    | 13,5    | --      |

**Tableau 6.14 – Paramètres de décomposition des courbes d'injection localisée à 0,5 r**

Selon l'hypothèse initiale, le délai associé à l'écoulement PFR dans la portion cylindrique du décanteur est de  $Z = 0,32 \approx 45,0$  minutes. En soustrayant cette valeur de la courbe d'écoulement global ( $Z$  de l'écoulement global  $- 0,32$ ), on observe que le second pic devrait débiter à  $Z = 0,17 \approx 15,0$  minutes (section 6.2.3.2). Le délai avant le second pic de décomposition des courbes d'injections localisées à  $0,5 r$  est de  $Z = 0,16$  ( $\sim 17,5$  minutes selon la courbe  $E(t)$ ). Ce délai représente le « temps minimal » pris par le traceur pour traverser le cône et la moitié du râteau (Figure 6.40). Conséquemment, aucune différence de délai n'est observée et la courbe d'écoulement global décalée peut donc être directement comparée à celles des injections localisées à  $0,5 r$ . Ainsi, les seconds pics des injections localisées à  $0,5 r$  ( $0,31$  et  $0,29$ ) correspondent alors au pic 2 de l'écoulement global ( $0,63 - 0,32 = 0,31$ ). Encore une fois, ces observations supportent l'hypothèse initialement émise.

En comparant les décompositions des pics 1 et 3, on observe alors que le premier pic est associé à la zone d'écoulement centrale à  $r = 0$  (chevauchement des zones) et que le troisième pic représente la dilution du traceur dans le lit de boue suite à l'action du râteau (continuité de l'écoulement du pic 2). Le pic 4 est représentatif d'un court-circuit dans l'écoulement qui existe dans la zone à  $0,5 r$ . C'est le même court-circuit qui est observé dans l'écoulement global. Il est cependant difficile d'amener une explication logique à la présence d'un court-circuit dans cette zone. Il est possible que la proximité de l'alimentation favorise la création d'un court-circuit. Peu importe la raison, les observations tendent à confirmer l'hypothèse initialement émise.



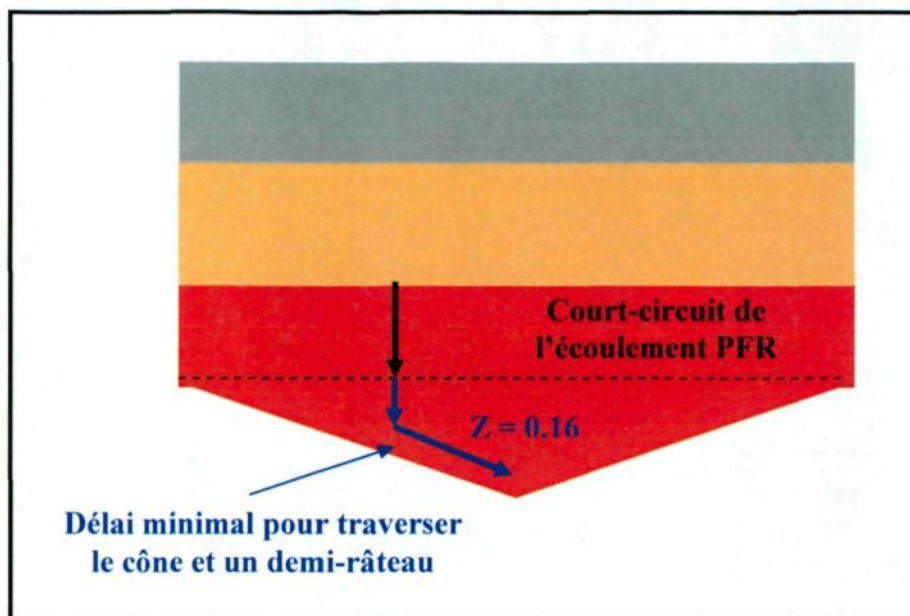
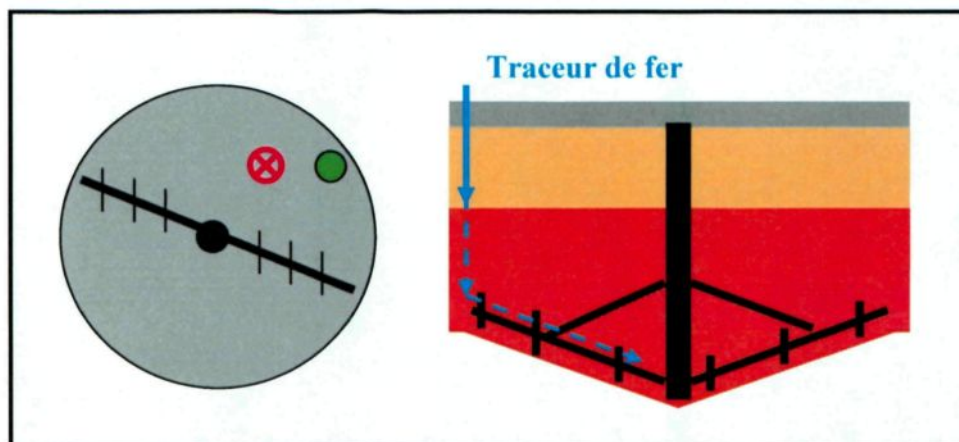


Figure 6.40 – Écoulement de la boue dans la portion conique du décanteur à 0,5 r

#### 6.4.5.3 Injections localisées à $r = r$

Selon l'hypothèse précédemment émise, la courbe obtenue pour une injection localisée à  $r$  devrait être principalement représentée par deux pics similaires aux pics 3 et 5 de la décomposition de l'écoulement global. Cette zone représente donc la portion la moins active du décanteur. Les mêmes paramètres opératoires ont été utilisés pour réaliser cet essai. La projection de la trajectoire du traceur de fer dans le décanteur est illustrée à la figure suivante.





**Figure 6.41 – Injection localisée à  $r = r$**

La Figure 6.42 présente la courbe  $E(Z)$  obtenue pour une injection localisée à  $r$ . Le taux de recouvrement du traceur est de 89,4 %. La portion manquante du traceur est probablement dans la traînée manquante de la courbe  $E(Z)$ . Le temps de résidence moyen est de 96,0 min et la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  de 0,76. La courbe est décomposée en deux pics principaux de forme aplatie. En supposant que le délai associé à l'écoulement PFR à l'intérieur du décanteur est encore une fois court-circuité ( $Z = 0,32 \approx 45,0$  minutes), on observe alors que le troisième pic devrait débuter à  $Z = 0,29 \approx 35,0$  minutes (section 6.2.3.2). Le délai avant le troisième pic de décomposition de la courbe d'injection localisée à  $r$  est de  $Z = 0,23$  ( $\sim 30,1$  minutes selon la courbe  $E(t)$ ) et représente la quantité minimale de matériel devant être évacuée avant de détecter le traceur (Figure 6.43). La différence de délai ( $0,29 - 0,23 = 0,06$ ) doit donc être soustraite de la courbe RTD de l'injection localisée à  $r$ . On observe ainsi que le troisième pic de l'injection localisée à  $r$  ( $0,63 - 0,06 = 0,57$ ) correspond au pic 3 de l'écoulement global ( $0,89 - 0,32 = 0,57$ ). Le Tableau 6.15 présente les paramètres de décomposition de la courbe  $E(Z)$ .

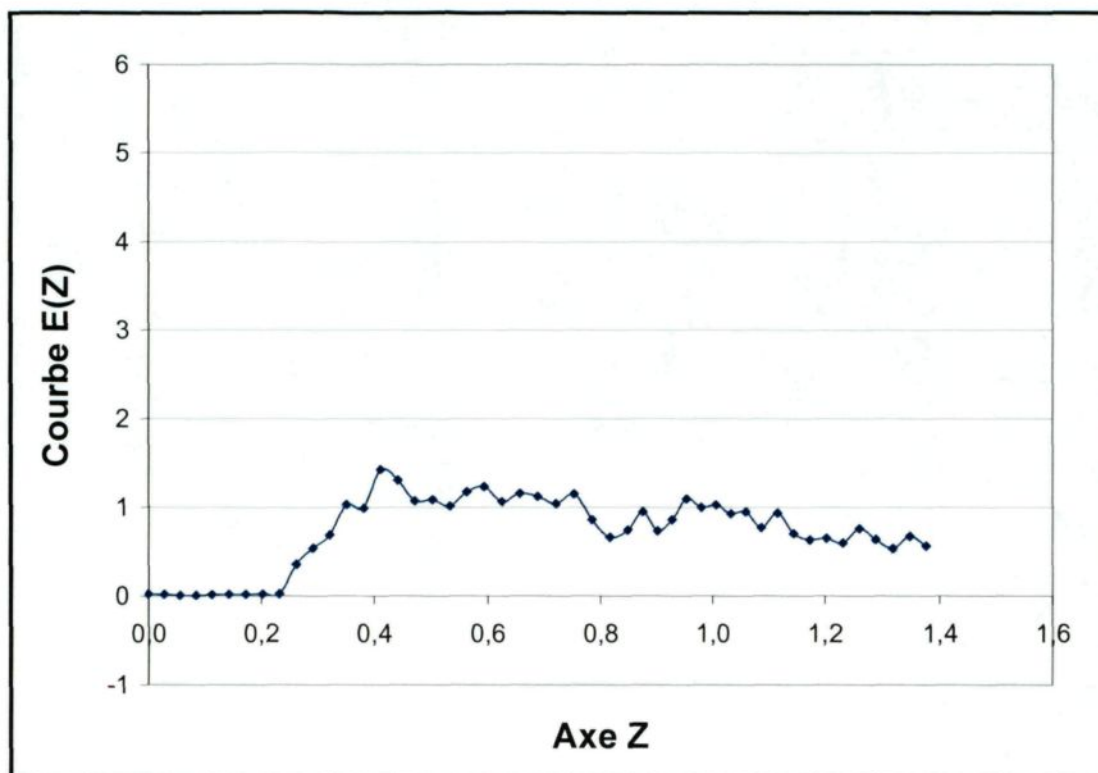


Figure 6.42 – Courbe  $E(Z)$  d'une injection localisée à  $r = r$

|                               |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|-------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Écoulement global             | N                  | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|                               | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|                               | Aire               | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| Injection localisée à $r = r$ | N                  | --      | --      | 3       | --      | 3       |
|                               | $Z_{\text{moyen}}$ | --      | --      | 0,63    | --      | 1,20    |
|                               | Aire               | --      | --      | 66,4    | --      | 27,7    |

Tableau 6.15 – Paramètres de décomposition de la courbe d'injection localisée à  $r$

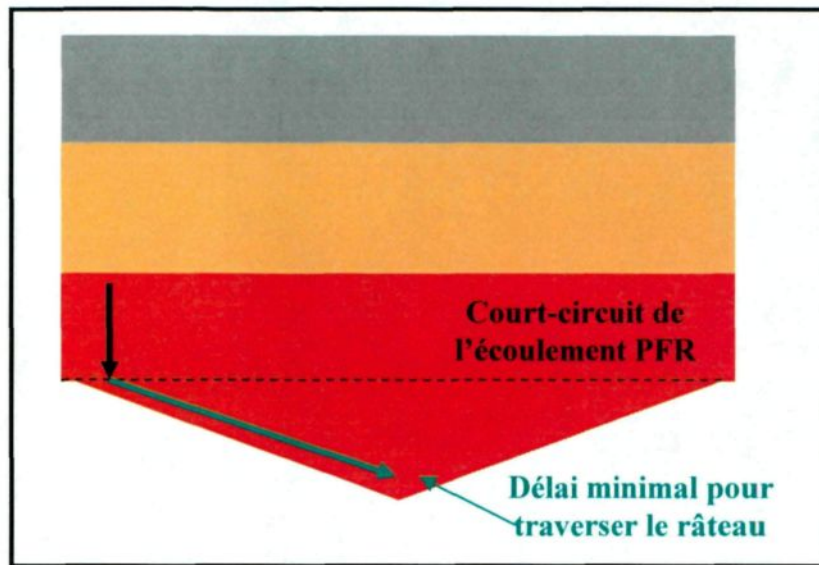
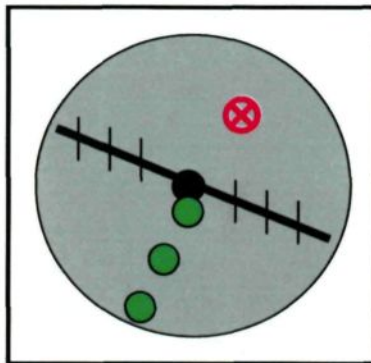


Figure 6.43 – Écoulement de la boue dans la portion conique du décanteur à r

#### 6.4.5.4 Injections localisées à 180 degrés

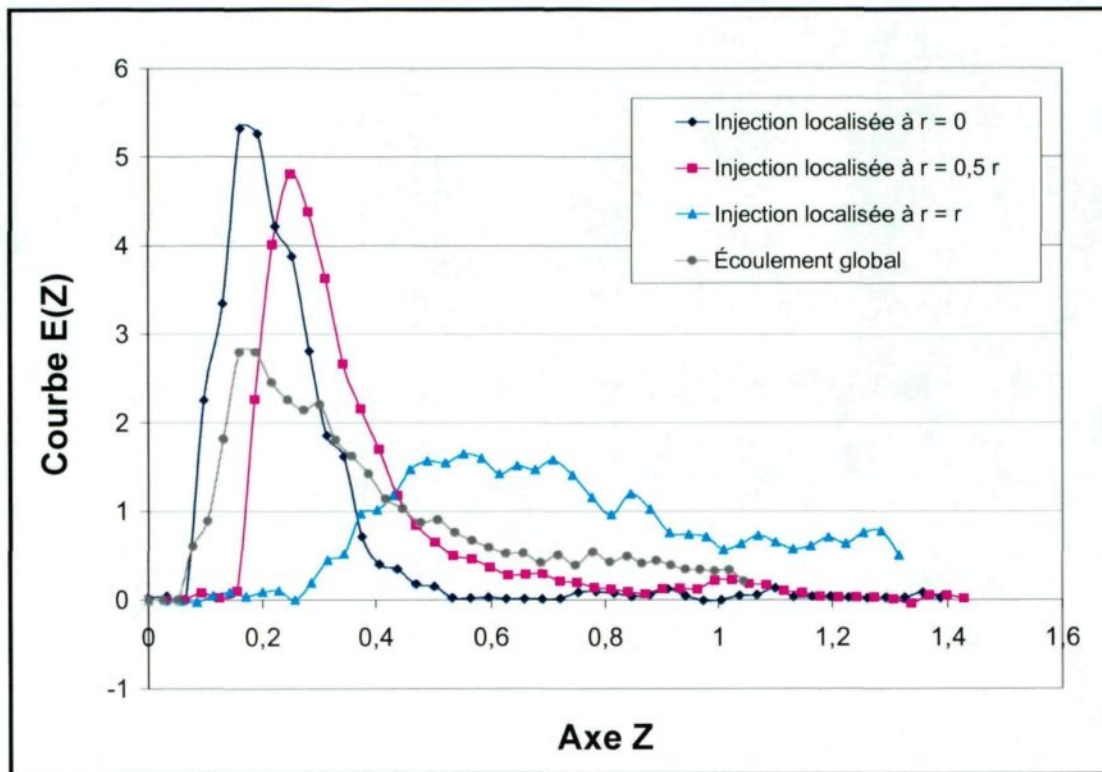
Des injections localisées à 180 degrés de l'alimentation sont effectuées afin d'observer si le comportement de chacune des zones est le même des deux côtés du décanteur. La Figure 6.44 présente les trois zones d'injection localisée (points verts) et l'emplacement de l'alimentation (point rouge). Les paramètres d'opération sont les mêmes que ceux établis pour les essais de calibration.



### Figure 6.44 – Injection localisée à 180 degrés de l'alimentation

La figure suivante présente les trois courbes  $E(Z)$  obtenues pour des injections localisées à 180 degrés de l'alimentation. Le taux de recouvrement du traceur de fer est de 88,0 % pour  $r = 0$ , 92,0 % pour  $r = 0,5 r$  et 97,1 % pour  $r = r$ . La valeur  $Z_{\text{moyen}}$  de chacune des courbes est de 0,25, 0,37 et 0,74. Les valeurs du temps de résidence moyen, selon les courbes  $E(t)$ , sont respectivement de 30,0 min, 39,6 min et 94,9 min. Ces valeurs ( $Z_{\text{moyen}}$  et temps de résidence) sont les mêmes que celles obtenues pour les précédentes injections localisées. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  de l'injection localisée à 0,5  $r$  est cependant légèrement supérieure à celle obtenue précédemment ( $0,37 > 0,30$ ). Ceci s'explique en partie par l'absence du court-circuit. En effet, si on retire le court-circuit des courbes de RTD des injections localisées à 0,5  $r$  (Figure 6.39), on obtient alors une valeur plus proche de celle présentement obtenue. Les paramètres de décomposition des courbes sont présentés au Tableau 6.16. À l'exception de l'injection à 0,5  $r$ , les courbes sont décomposées de la même façon que les injections localisées. En effet, la décomposition des courbes d'injections localisées à 0,5  $r$  (Tableau 6.14) présente plus d'une zone d'écoulement. Ainsi, la principale différence entre les essais provient du court-circuit observé pour une injection localisée à 0,5  $r$  du même côté de l'alimentation. Ce court-circuit ne semble pas être présent à l'opposé de l'alimentation.





**Figure 6.45 – Courbes  $E(Z)$  pour des injections localisées à 180 degrés de l'alimentation**

Les différences de délais entre l'origine et les pics de décomposition de l'écoulement global et des injections localisées sont de  $(0 - 0,06)$  0,06 pour le premier pic ( $r = 0$ ),  $(0,17 - 0,16)$  0,01 pour le second ( $r = 0,5 r$ ) et de  $(0,29 - 0,26)$  0,03 pour le troisième ( $r = r$ ). Pour comparer les décompositions, on doit donc soustraire chacun des délais respectifs des courbes d'injections localisées et soustraire la valeur de l'écoulement PFR (0,32) à la courbe d'écoulement global. Ou plus simplement, un décalage de 0,26 ( $0,32 - 0,06$ ) doit être utilisé pour faire correspondre les  $Z_{\text{moyen}}$  des pics 1, de 0,31 ( $0,32 - 0,01$ ) pour les pics 2 et de 0,29 ( $0,32 - 0,03$ ) pour les pics 3. Un exemple de décalage de la courbe d'écoulement global est présenté à la Figure 6.45.

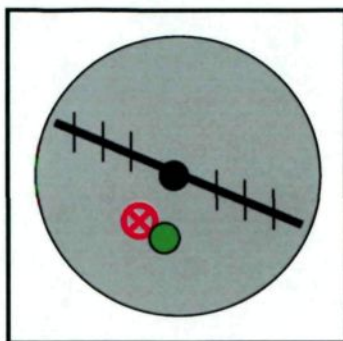
|   |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|---|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Écoulement global</b>                            | <b>N</b>                 | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|   | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|   | <b>Aire</b>              | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| <b>Injection localisée à <math>r = 0</math></b>     | <b>N</b>                 | 8       | 4       | --      | 18      | --      |
|   | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,20    | 0,33    | --      | 0,09    | --      |
|   | <b>Aire</b>              | 73,4    | 15,8    | --      | 4,9     | --      |
| <b>Injection localisée à <math>r = 0,5 r</math></b> | <b>N</b>                 | --      | 5       | 3       | --      | --      |
|   | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | --      | 0,29    | 0,48    | --      | --      |
|   | <b>Aire</b>              | --      | 75,9    | 17,4    | --      | --      |
| <b>Injection localisée à <math>r = r</math></b>     | <b>N</b>                 | --      | --      | 3       | --      | 3       |
|   | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | --      | --      | 0,66    | --      | 1,41    |
|   | <b>Aire</b>              | --      | --      | 72,7    | --      | 14,0    |

**Tableau 6.16 – Paramètres de décomposition des courbes d'injection localisée à 180 °**

#### **6.4.5.5 Court-circuit dans la zone de $0,5 r$**

Un court-circuit dans l'écoulement a été observé lors des injections localisées à  $0,5 r$  effectuées du même côté que l'alimentation. Ce court-circuit n'est pas présent lors d'une injection localisée à  $0,5 r$  à l'opposé de l'alimentation. Par conséquent, il semble plausible que le court-circuit est créé par la proximité de l'alimentation. Pour valider cette hypothèse, l'alimentation a été déplacée à l'opposé de sa position normale (elle est localisée à  $0,5 r$  mais à 180 degrés de sa position initiale) et une injection localisée à  $0,5 r$  a été effectuée à

proximité de l'alimentation. La Figure 6.46 présente le nouvel emplacement de l'alimentation et de l'injection effectuée.



**Figure 6.46 – Alimentation et injection localisée à 0,5 r à 180 degrés**

La Figure 6.47 présente la courbe expérimentale obtenue. Une première observation visuelle permet de constater que le court-circuit ne semble pas être créé par l'alimentation. En effet, si tel avait été le cas, le court-circuit aurait dû apparaître également dans la courbe tracée. Par conséquent, le court-circuit observé à 0,5 r semble dû à un phénomène existant seulement dans une portion spécifique du décanteur. Par exemple, ce phénomène peut être dû à un léger débalancement du niveau du décanteur ou à une particularité quelconque de la géométrie physique du décanteur. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est de 0,37 et le temps de résidence moyen selon la courbe  $E(t)$  est de 50,0 min. Un taux de recouvrement du traceur de 88,4 % est obtenu. Les paramètres de décomposition sont présentés au Tableau 6.17. À l'exception du court-circuit, les paramètres de décomposition des pics principaux (pic 1, 2 et 3) sont approximativement les mêmes. On observe cependant quelques variations dans la composition des écoulements (variation de  $N$ ) indiquant ainsi une modification légère de



l'écoulement de la boue suite au changement d'emplacement de l'alimentation. En somme, l'alimentation ne semble pas provoquer de court-circuit dans l'écoulement.

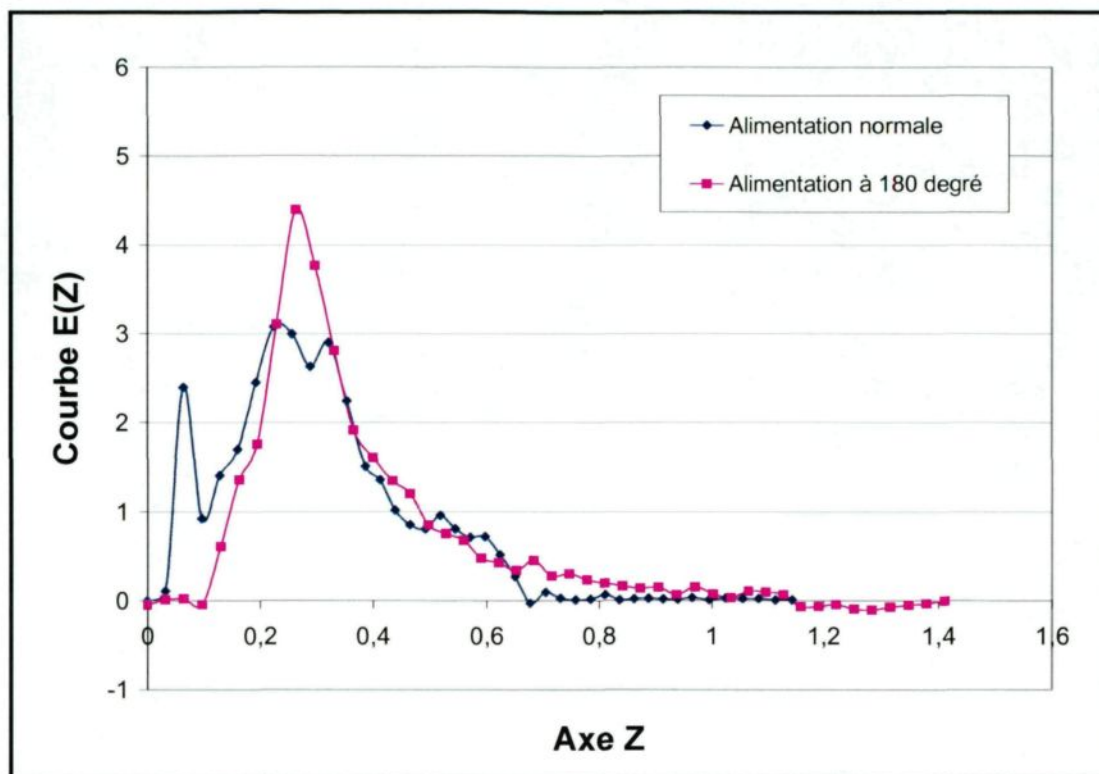


Figure 6.47 – Influence de l'alimentation pour une injection localisée à 0,5 r

|                      |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|----------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Alimentation normale | N                  | 6       | 4       | 3       | 19      | --      |
|                      | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,18    | 0,31    | 0,59    | 0,07    | --      |
|                      | Aire               | 21,5    | 50,2    | 13,3    | 9,6     | --      |
| Alimentation opposée | N                  | 6       | 10      | 3       | --      | --      |
|                      | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,16    | 0,29    | 0,53    | --      | --      |
|                      | Aire               | 7,9     | 62,4    | 27,7    | --      | --      |

Tableau 6.17 – Décomposition d'injection localisée à 0,5 r et d'alimentation opposée

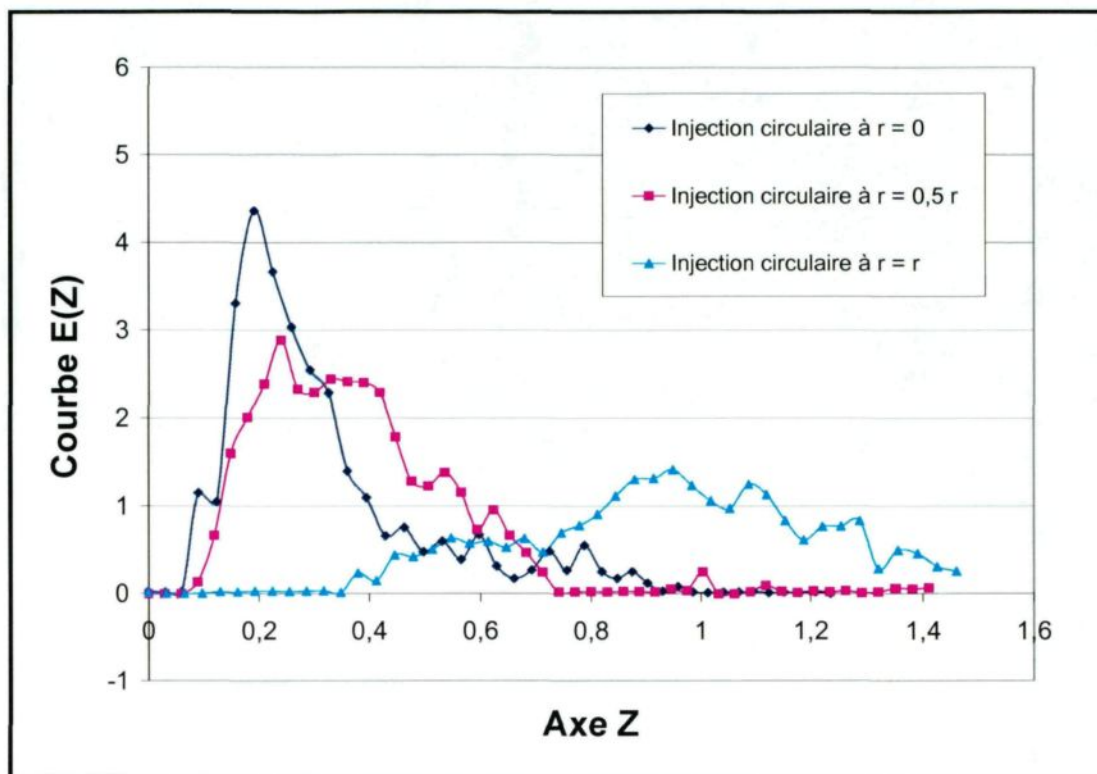


### 6.4.6 *Injectons circulaires*

Les injections localisées permettent d'analyser le comportement dans une zone spécifique du décanteur. Il a été observé que les comportements d'écoulement ne sont pas tous les mêmes dans une zone donnée. Par exemple, la présence du court-circuit à  $0,5 r$  qui n'existe pas des 2 côtés du décanteur. Ainsi, les injections circulaires permettent d'obtenir la RTD complète d'une zone donnée. Les injections circulaires sont réalisées à l'aide de 4 seringues. La poudre de fer est séparée en 4 portions et mélangée à de la boue de sousverse. Lors de l'injection, une seringue est utilisée par quart de décanteur. Par conséquent, l'injection peut s'étaler sur quelques minutes (environ 2 à 5 minutes). Trois zones d'écoulement sont à l'étude : près du centre ( $r = 0$ ), à mi-rayon du décanteur ( $r = 0,5 r$ ) et près de la paroi ( $r = r$ ). Une illustration des injections circulaires est présentée à la Figure 5.24.

La Figure 6.48 présente les trois courbes obtenues. Les quantités de traceur retrouvées après les essais expérimentaux sont respectivement de 88,1 %, 99,5 % et 91,6 %. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  de chacune des courbes est de 0,32, 0,36 et 0,94. Le temps de résidence moyen est de 40,2 min pour l'injection à  $r = 0$ , 45,0 min pour  $r = 0,5 r$  et 118,5 min pour  $r = r$ . La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  de l'injection circulaire à  $r = 0$  est possiblement légèrement surestimée. En effet, on observe sur la courbe une traînée constituée de plusieurs petits pics. Cette traînée est probablement due à l'accumulation de fer sur les structures du râseau et qui prend plus de temps à sortir. En retirant cette portion de la courbe, une valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  de

0,24 est obtenue. Cette dernière est comparable à celles obtenues pour les injections localisées au centre du décanteur ( $r = 0$ ) (0,25 et 0,25).



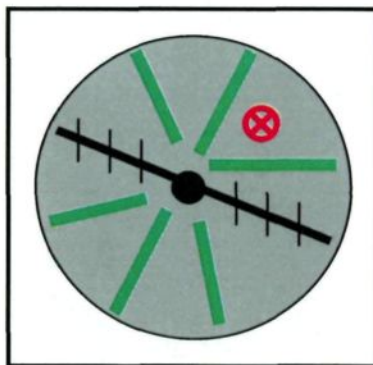
**Figure 6.48 – Courbes  $E(Z)$  pour trois injections circulaires**

L'injection circulaire à  $0,5 r$  possède la même valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  (0,36) que celles obtenues précédemment par des injections localisées à  $0,5 r$  (0,37, 0,3 et 0,29). On observe également que le court-circuit n'est pas très apparent, confirmant ainsi que celui-ci n'existe que dans des zones très restreintes du décanteur. L'injection circulaire à  $r = r$  est très allongée et la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  (0,94) est supérieure à celle obtenue précédemment (0,76 et 0,74) indiquant ainsi que certaines portions du décanteur sont plus ou moins lentes en fonction des pourcentages solide présents dans le lit.

En somme, les courbes d'injections circulaires confirment que la majorité du décanteur fonctionne de la même façon. Les zones centrales ( $r = 0$  et  $r = 0,5 r$ ) sont beaucoup plus actives que celles près de la paroi. Par conséquent, la quantité de matière traitée par le décanteur provient majoritairement de ces zones plus actives. La zone près de la paroi ne contribue donc pas beaucoup à l'écoulement de la boue.

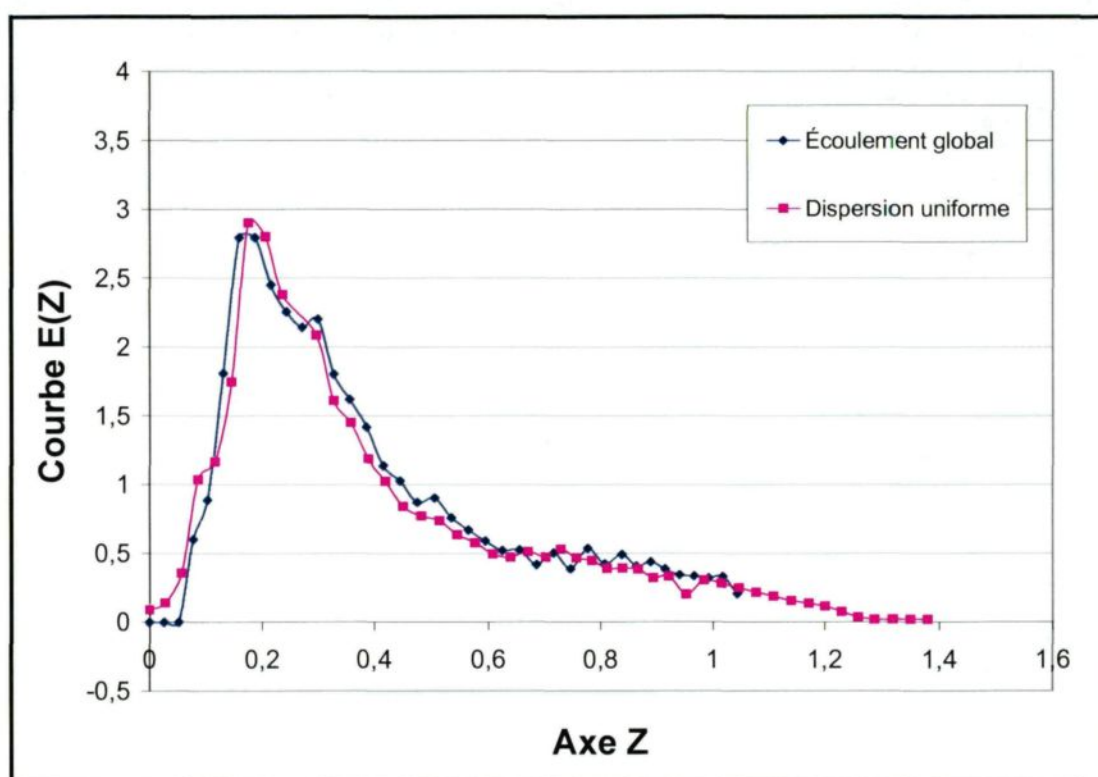
#### 6.4.7 *Dispersion uniforme*

Un essai de dispersion uniforme a été effectué afin d'observer la signature du décanteur lorsque le fer est parfaitement dispersé à la surface du lit. Pour effectuer cette dispersion, la poudre de fer est séparée en 6 portions. Chacune des portions est mélangée à de la boue de sousverse et introduite dans une seringue pour un total de six seringues. Chaque seringue sert à tracer un trait à l'intérieur du décanteur. La Figure 6.49 illustre comment la dispersion uniforme a été effectuée.



**Figure 6.49 – Dispersion uniforme**

Les paramètres d'opération sont les mêmes que ceux utilisés lors des essais de calibration. La Figure 6.50 présente la courbe de dispersion uniforme obtenue. Le taux de recouvrement du traceur de fer est de 98,0 %. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont de 0,41 pour la dispersion uniforme et 0,65 pour l'écoulement global. La courbe d'écoulement global doit donc être décalée pour comparer les pics de décomposition. Ainsi, en soustrayant les délais initiaux de chacune des courbes, on obtient une valeur de décalage de 0,26.



**Figure 6.50 – Courbe  $E(Z)$  d'une dispersion uniforme**

Les paramètres de décomposition des courbes sont présentés au Tableau 6.18. En soustrayant la valeur du délai aux décompositions de l'écoulement global, on constate que les pics sont essentiellement localisés aux mêmes endroits. La quantité de matériels traitée



par chacun des pics est équivalente. Les comportements d'écoulement sont eux aussi similaires. En somme, lorsque la poudre de fer est ajoutée via l'alimentation, celle-ci est dispersée de façon uniforme à la surface du lit.

|                            |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|----------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Écoulement global</b>   | <b>N</b>                 | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|                            | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|                            | <b>Aire</b>              | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| <b>Dispersion uniforme</b> | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       |
|                            | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,22    | 0,38    | 0,62    | 0,09    | 0,96    |
|                            | <b>Aire</b>              | 43,1    | 23,4    | 17,5    | 5,4     | 10,9    |

**Tableau 6.18 – Paramètres de décomposition de la dispersion uniforme**

#### **6.4.8 Vitesse de rotation du râteau**

Des essais de variation de la vitesse de rotation du râteau ont été effectués afin d'évaluer l'influence sur la RTD du décanteur. Théoriquement, la vitesse de rotation a une incidence sur le degré de compaction de la boue et possiblement sur la structure du lit, l'écoulement de la boue ainsi que sur les délais d'apparition des pics décomposés. Les paramètres expérimentaux sont les mêmes mais la vitesse de rotation est variable. Trois vitesses ont été utilisées : lente (7 rotations / heure), normale (15 rotations / heure) et rapide (29 rotations / heure). Les essais de variation de la vitesse de rotation ont principalement été effectués avec le deuxième type de boue. Par conséquent, les paramètres et mesures expérimentaux sont comparés avec l'essai de calibration 4 de la section 6.3.2.

#### 6.4.8.1 Vitesse plus lente

Lorsque la vitesse de rotation du râteau est plus lente (moitié moins vite que lors des essais de calibration), on observe une augmentation de la concentration solide à la sousverse. En effet, la valeur moyenne de la fraction solide obtenue est de 53,0 % p/p versus 49,0 % p/p de l'essai de calibration 4. Le couple est également augmenté, passant de 170 à 200. Le débit de la sousverse est moins élevé, puisque la fraction solide est plus importante (290 mL/min versus 333 mL/min). La quantité de fer retrouvée après l'essai est de 81,5 %. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est de 0,69. La Figure 6.51 présente les courbes  $E(Z)$  obtenues pour des vitesses de rotation normale et lente.

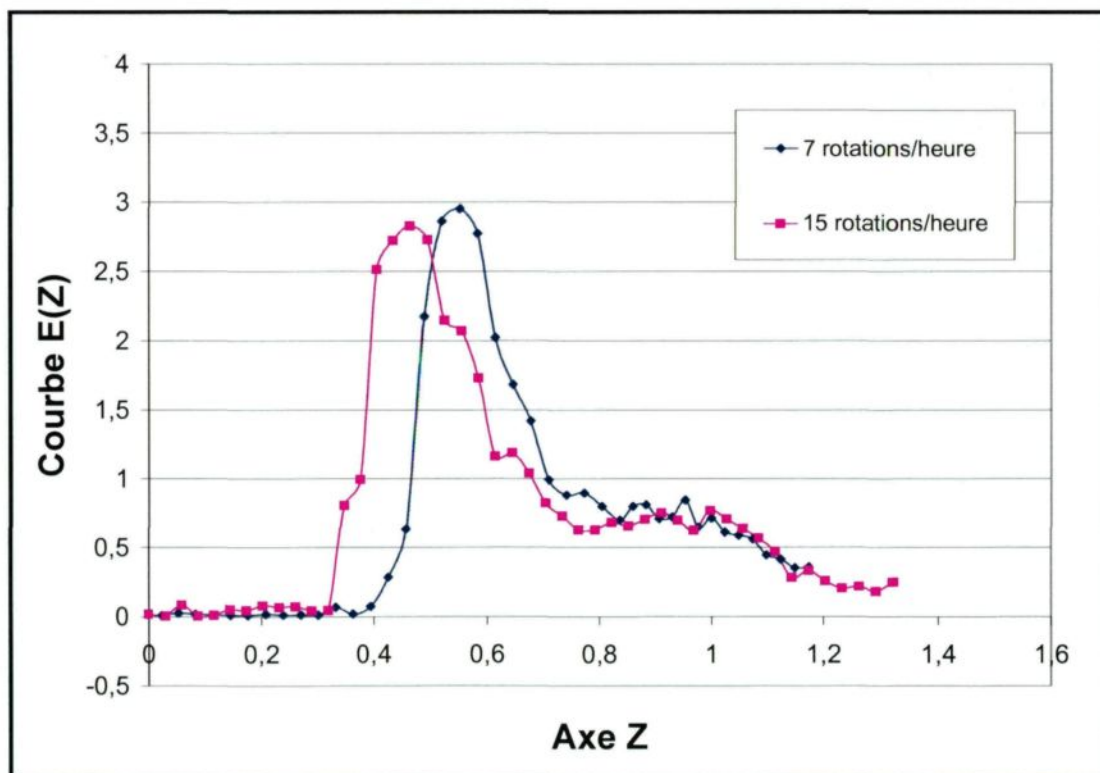


Figure 6.51 – Courbe  $E(Z)$  pour une vitesse de rotation plus lente

Première observation, le délai entre l'origine et le début de la courbe est plus long lorsque la vitesse de rotation du râteau est plus lente. Un délai de  $Z = 0,36$  ( $\sim 50,0$  min) est obtenu plutôt que  $0,32$  ( $\sim 45,0$  min). L'augmentation de la valeur du délai peut s'expliquer par le fait que la fraction solide de la boue est plus importante ( $53,0$  % p/p versus  $49,0$  % p/p). En effet, le traceur doit parcourir un écoulement PFR (écoulement dans la portion cylindrique du décanteur) de concentration plus importante augmentant ainsi légèrement la valeur de  $Z$  et du temps.

Selon l'hypothèse initiale, chacun des pics de la décomposition représente une zone d'écoulement situé à une distance spécifique de la sousverse et dont le déplacement est régi par la vitesse de rotation du râteau. Ainsi, lorsque la vitesse de rotation du râteau est plus lente, le temps pour effectuer une rotation est de  $8,5$  min plutôt que  $4,0$  min. Par conséquent, le temps pour transporter un volume de boue de la paroi à la sousverse est le double ( $68,0$  min à  $76,5$  min versus  $32,0$  min à  $36,0$  min). Les temps d'apparition des pics 1, 2 et 3 de chacun des essais sont présentés au Tableau 6.19. Le temps entre parenthèses représente la valeur du temps moins la valeur du délai initial entre l'origine et le début de la courbe (ex :  $60 - 41 = 19$  minutes). En comparant ces temps, on constate que le temps d'apparition des pics de la vitesse de rotation la plus lente est approximativement égal au double de la valeur de ceux de la vitesse de rotation normale.

| Temps          | 15 rotations/heure | Comparaison                                 | 7 rotations/heure |
|----------------|--------------------|---|-------------------|
| <b>Pic # 1</b> | 41 min (0 min)     | $2 * 0 \text{ min} \approx 0 \text{ min}$   | 50 min (0 min)    |
| <b>Pic # 2</b> | 60 min (19 min)    | $2 * 19 \text{ min} \approx 38 \text{ min}$ | 87 min (37 min)   |
| <b>Pic # 3</b> | 79 min (38 min)    | $2 * 38 \text{ min} \approx 76 \text{ min}$ | 115 min (65 min)  |

**Tableau 6.19 – Comparaison des temps d'apparition des pics de décomposition 1, 2 et 3 pour une vitesse de rotation plus lente**

Les mêmes constatations peuvent être faites en effectuant la même analyse, mais pour les valeurs de Z. Le Tableau 6.20 présente les valeurs de Z d'apparition des pics 1, 2 et 3 des deux essais. On constate qu'effectivement, les valeurs de Z pour la vitesse de rotation la plus lente sont équivalentes au double de celles obtenues pour une vitesse de rotation normale. Par conséquent, l'hypothèse initiale est encore une fois validée.

| Z              | 15 rotations/heure | Comparaison             | 7 rotations/heure |
|----------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| <b>Pic # 1</b> | 0,32 (0)           | $2 * 0 \approx 0$       | 0,36 (0)          |
| <b>Pic # 2</b> | 0,47 (0,15)        | $2 * 0,15 \approx 0,30$ | 0,65 (0,29)       |
| <b>Pic # 3</b> | 0,61 (0,29)        | $2 * 0,29 \approx 0,58$ | 0,86 (0,5)        |

**Tableau 6.20 – Comparaison des valeurs d'apparition des pics de décomposition 1, 2 et 3 pour une vitesse de rotation plus lente selon l'axe Z**

L'analyse par la méthode de décomposition des pics des deux courbes est présentée dans le Tableau 6.21. On observe que la décomposition en pics est très différente d'un essai à l'autre, démontrant ainsi que la vitesse de rotation a une incidence sur le déplacement et



l'écoulement de la boue dans le décanteur. La zone centrale est beaucoup plus active dans le cas de la vitesse de rotation la plus lente. L'écoulement des pics 2 et 3 ressemble plus à un CSTR (la boue est mieux mélangée ou diluée lorsque la vitesse de rotation est plus lente). Néanmoins, les zones des pics 2 et 3 sont beaucoup plus lentes et de ce fait, contribuent moins à l'écoulement global de la boue. Éventuellement, ces zones pourraient être associées à des zones mortes. En somme, la vitesse de rotation influence grandement l'écoulement et la structure du lit de boue dans un décanteur.

|                                      |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|--------------------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Vitesse de 7 rotations/heure</b>  | <b>N</b>                 | 6       | 2       | 2       | --      | --      |
|                                      | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,58    | 0,98    | 1,14    | --      | --      |
|                                      | <b>Aire</b>              | 58,3    | 30,6    | 8,1     | --      | --      |
| <b>Vitesse de 15 rotations/heure</b> | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       |
|                                      | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,47    | 0,60    | 0,83    | 0,35    | 1,11    |
|                                      | <b>Aire</b>              | 40,4    | 24,0    | 14,7    | 3,6     | 15,2    |

**Tableau 6.21 – Paramètres de décomposition pour une vitesse de rotation plus lente**

#### **6.4.8.2 Vitesse plus rapide**

Lorsque la vitesse de rotation du râteau est plus rapide (le double de celle utilisée lors des essais de calibration) on observe une variation de la concentration solide à la sousverse. Une valeur moyenne de fraction solide de 51,9 % p/p est obtenue versus 49,0 % p/p de l'essai de calibration 4. Contrairement aux essais précédents, le couple n'a jamais été stable. En effet, la valeur du couple a constamment augmenté au cours de l'essai. Cette

augmentation varie cependant en fonction du temps (remplissage, activation de la sousverse ou attente de temps de résidence). Puisque la fraction solide à la sousverse n'a pas variée de façon excessive ( $51,9 \pm 0,4$  % p/p), la variation du couple indique alors une modification de la structure de l'écoulement de la boue. Du point de vue expérimental, la trace obtenue de cet essai est moins significative et l'analyse obtenue doit être considérée avec un certain recul. La quantité de fer retrouvée après l'essai est de 85,4 %. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est de 0,73. La Figure 6.52 présente la courbe  $E(Z)$  obtenue pour une vitesse de rotation normale et rapide. Notons que la courbe expérimentale obtenue n'est pas complète due à un arrêt prématuré de l'essai. Néanmoins, la tendance des pics principaux est observable.

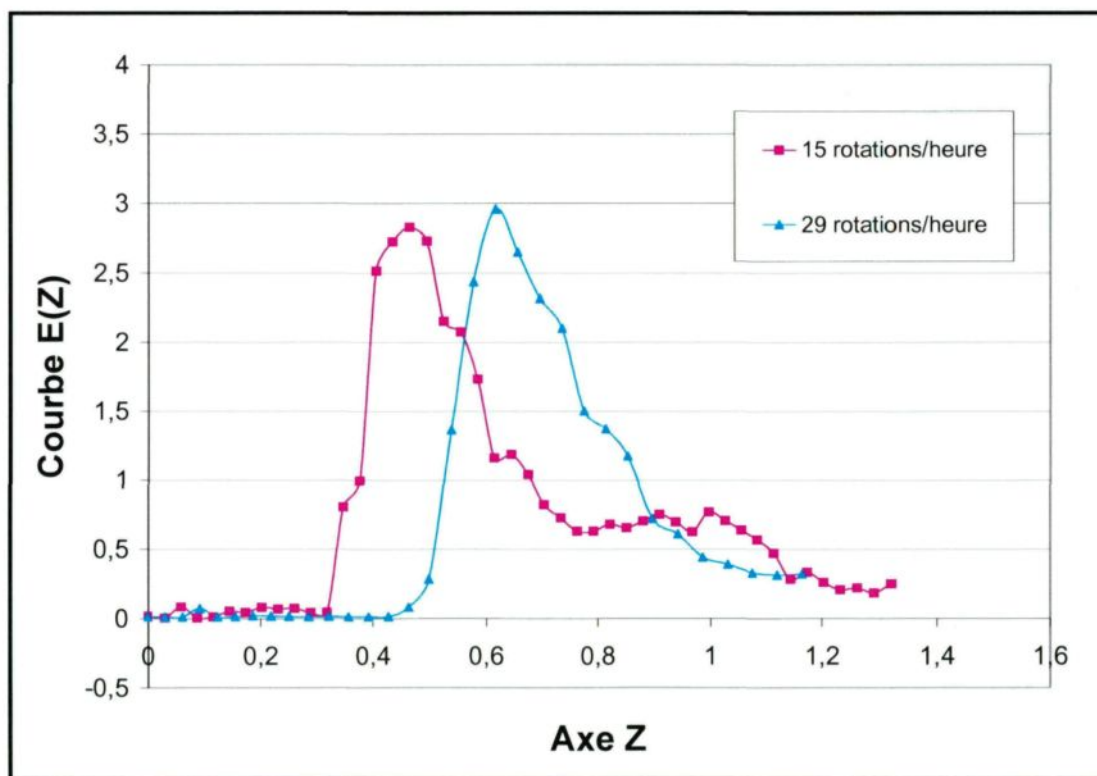


Figure 6.52 – Courbe  $E(Z)$  pour une vitesse de rotation plus rapide

Les paramètres de décompositions des pics sont présentés au Tableau 6.22. On observe que la zone d'écoulement associée au pic 1 ( $r = 0$ ) est beaucoup plus importante ( $69,9 > 40,4$ ), indiquant ainsi que plus de matériel est traité par cette zone. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  des trois premiers pics sont beaucoup plus grandes que celles obtenues pour une vitesse d'agitation normale. En effet, dans ces conditions, le râteau agit plus comme un mélangeur que comme une aide au transport de la boue (diminution de l'efficacité du râteau pour le transport radial). D'autre part, la forme de la courbe fait penser à la trace d'un CSTR. En effet, il est presque possible de représenter l'écoulement avec seulement trois CSTR en série (forme exponentielle) centrés à 0,68. Ainsi, de tous les essais réalisés jusqu'à maintenant, celui-ci est le plus représentatif d'un écoulement parfaitement agité dans le cône.

On observe également la présence d'un délai important entre les deux courbes. Ce délai peut s'expliquer en partie par l'augmentation de fraction solide à la sousverse. Une autre explication plausible serait que la vitesse de rotation des râteaux entraîne deux zones d'écoulement très distinctes dans le décanteur : une très agitée dans le cône « CSTR » et une autre associée à l'écoulement piston « PFR ». Entre ces deux zones existe une zone de transition. Le passage du traceur d'une zone à l'autre peut être plus difficile dû aux différences physiques importantes des écoulements.

|                               |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|-------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Vitesse de 15 rotations/heure | N                  | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       |
|                               | Z <sub>moyen</sub> | 0,47    | 0,60    | 0,83    | 0,35    | 1,11    |
|                               | Aire               | 40,4    | 24,0    | 14,7    | 3,6     | 15,2    |
| Vitesse de 29 rotations/heure | N                  | 5       | 4       | 3       | 4       | --      |
|                               | Z <sub>moyen</sub> | 0,66    | 0,83    | 1,0     | 0,53    | --      |
|                               | Aire               | 69,9    | 15,7    | 10,0    | 1,8     | --      |

**Tableau 6.22 – Paramètres de décomposition pour une vitesse de rotation plus rapide**

#### **6.4.9 Conditions d'opération**

Au Chapitre 5, il a été spécifié que certaines conditions d'opération pouvaient influencer l'écoulement de la boue dans le décanteur. Cette portion de la thèse présente donc les résultats obtenus pour des essais avec des conditions d'opération variées.

##### **6.4.9.1 Niveau de boue**

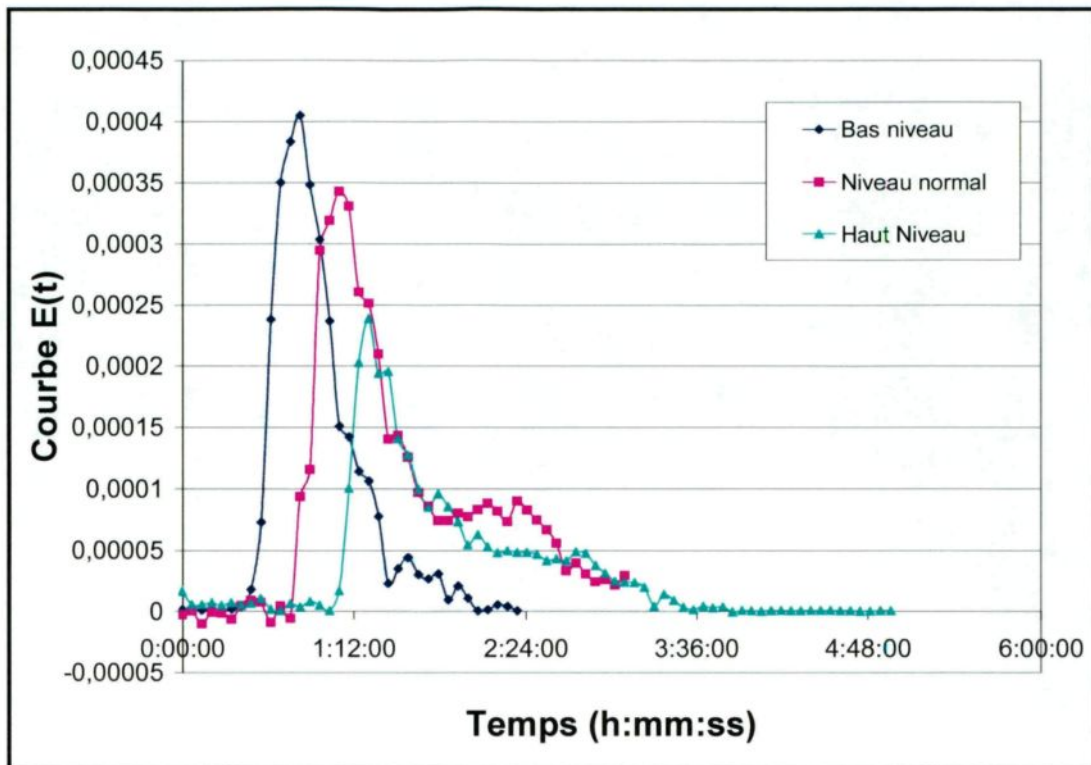
La hauteur du niveau de boue dans le décanteur influence la valeur du temps de résidence. En effet, plus celui-ci est élevé, plus le temps de résidence est long. Trois différents niveaux de boue ont été étudiés : un bas niveau (30,0 L de boue ou  $\approx 12,0$  cm), un niveau de boue intermédiaire (50,0 L de boue  $\approx 21,0$  cm) et un haut niveau de boue (70,0 L de boue  $\approx 38,0$  cm). Les essais ont principalement été réalisés avec le second type de boue et les résultats sont donc comparés aux essais de calibration 4, 5 et 6.

#### **6.4.9.1.1 Bas niveau**

Les paramètres d'opération sont les mêmes que lors des essais de calibration à l'exception du niveau de boue qui est inférieur. La quantité de traceur de fer retrouvée après l'expérience est de 78,9 %. La fraction solide à la sousverse ainsi que les autres mesures expérimentales sont similaires à celles obtenues lors des essais de calibration. La seule différence provient de la mesure du couple. En effet, ce dernier s'est stabilisé à une valeur inférieure (150 au lieu de 170). Cette différence peut s'expliquer par la diminution de la quantité de boue (diminution des forces) qui agit sur les râpeaux.

D'un point de vue théorique, lorsque le niveau de boue est bas, le temps de résidence est plus court que pour un niveau de boue normal. En supposant que le débit de sousverse est le même que celui obtenu au cours des essais de calibration 4, 5 et 6 (333 mL/min), le temps de résidence prévu pour un volume de 30,0 L serait de 90,1 minutes. La Figure 6.53 présente les courbes  $E(t)$  obtenues pour les trois essais de variation du niveau de boue. Le temps de résidence moyen est de 57,0 minutes, soit 63 % du temps de résidence initialement prévu. Il n'est pas surprenant d'obtenir une valeur inférieure puisque le même phénomène a été observé lors des essais de calibration.





**Figure 6.53 – Courbes  $E(t)$  pour des variations de la hauteur du niveau de boue**

La Figure 6.54 présente les courbes  $E(Z)$  obtenues pour un niveau de boue normal et bas. On observe que les courbes sont superposées l'une sur l'autre. Selon notre hypothèse de l'écoulement, la portion d'écoulement PFR (délai entre l'origine et la trace), dans ce cas, devrait être moins longue que celle obtenue pour un niveau de boue normal. Il ne faut cependant pas oublier que les courbes  $E(Z)$  permettent de comparer des systèmes ayant des volumes de boue différents. Par conséquent, même s'il existe des différences au niveau du délai, elles n'apparaîtront pas sur la courbe  $E(Z)$ . Néanmoins, sur les courbes  $E(t)$ , on observe que le délai initial est beaucoup moins long lorsque le niveau de boue est plus bas (24,5 minutes au lieu de 45,0 minutes).

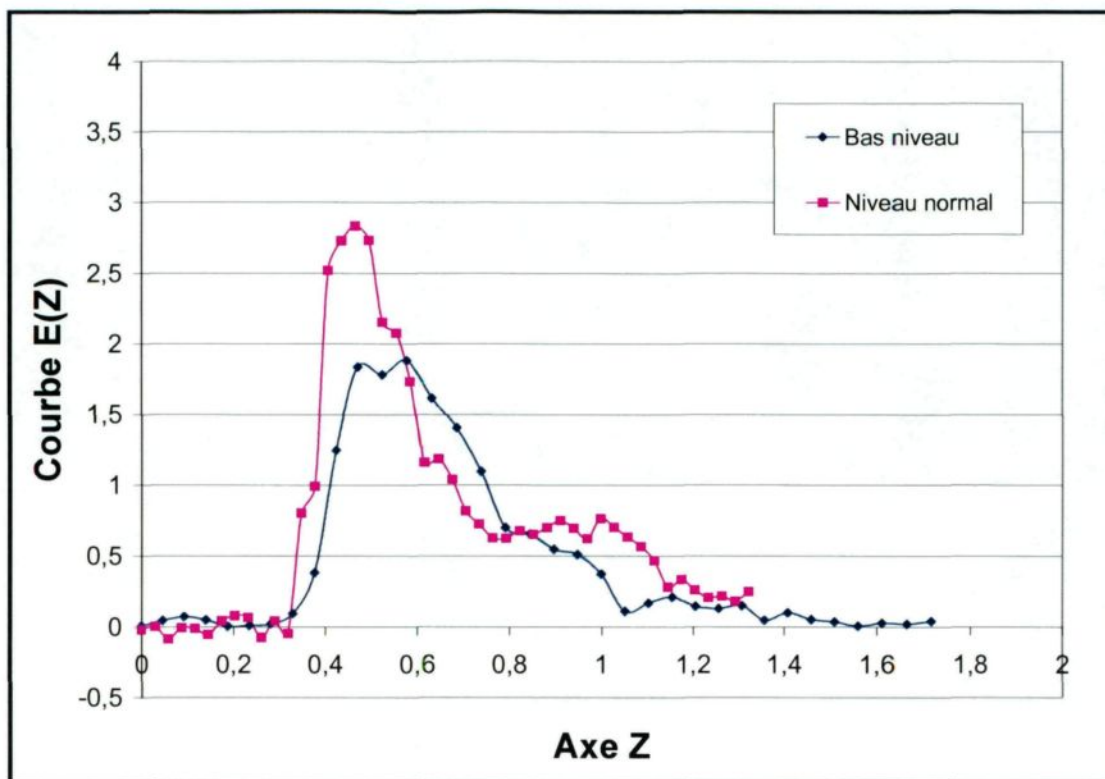


Figure 6.54 – Courbe  $E(Z)$  pour un bas niveau de boue

Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont respectivement de 0,68 et 0,66. L'augmentation de la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  indique que l'écoulement à l'intérieur du décanteur est différent. Une observation visuelle permet de constater que lorsque le niveau de boue est plus bas, les deux pics principaux sont beaucoup plus larges. Les paramètres de décomposition des courbes sont présentés au Tableau 6.23. On observe que les types d'écoulement (nombre « N » de CSTR) sont les mêmes pour les deux courbes. Cependant, l'emplacement ( $Z_{\text{moyen}}$ ) ainsi que la quantité de matériel circulant à l'intérieur (Aire) sont très différents. En fait, les pics 1 et 2 de la courbe du bas niveau de boue sont aussi importants l'un que l'autre. Autrement dit, la zone à mi-rayon ( $r = 0,5 r$ ) traite presque la même quantité de matériel

que le premier pic dans ces conditions. Donc, lorsque le niveau de boue est plus bas, les zones d'écoulement actives sont plus importantes. Néanmoins, la zone près de la paroi semble beaucoup moins active (9,9 % plutôt que 14,7 %). Il est alors possible de penser que la quantité manquante de traceur de fer est piégée dans une zone morte près de la paroi.

|                      |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|----------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Bas niveau</b>    | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | --      | 3       |
|                      | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,51    | 0,71    | 0,99    | --      | 1,26    |
|                      | <b>Aire</b>              | 39,5    | 43,3    | 9,9     | --      | 3,0     |
| <b>Niveau normal</b> | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       |
|                      | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,47    | 0,60    | 0,83    | 0,35    | 1,11    |
|                      | <b>Aire</b>              | 40,4    | 24,0    | 14,7    | 3,6     | 15,2    |

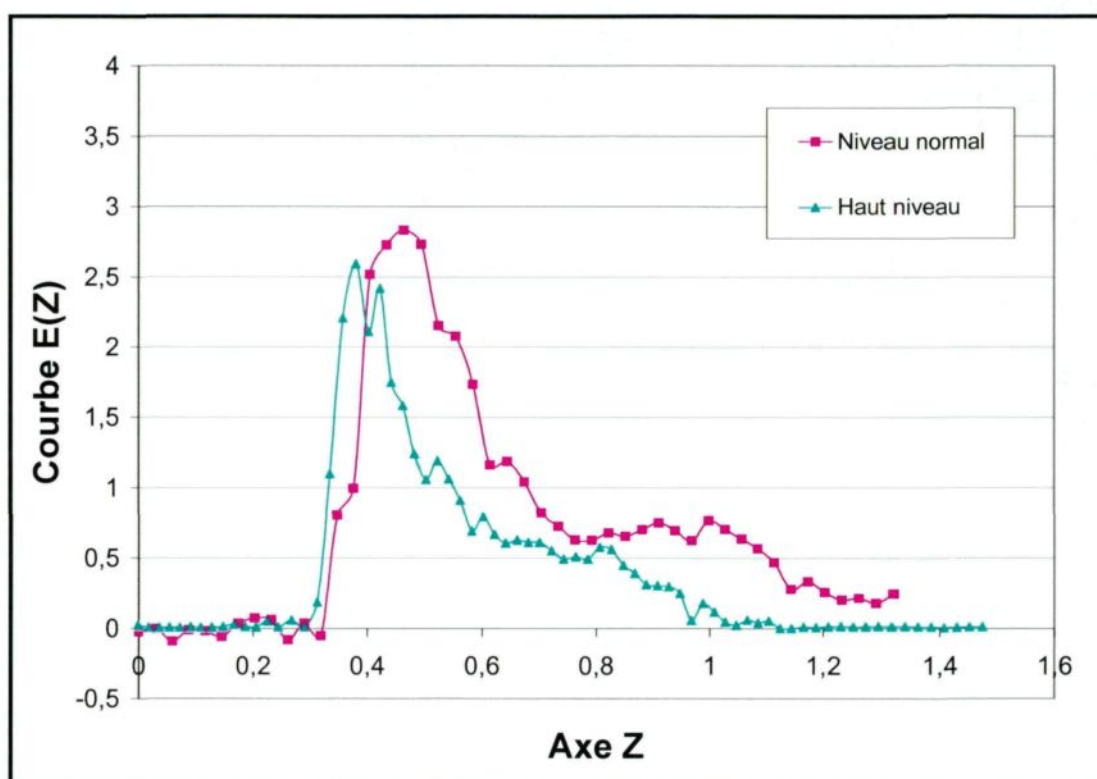
**Tableau 6.23 – Paramètres de décomposition des courbes pour un bas niveau de boue**

#### **6.4.9.1.2 Haut niveau**

Les paramètres d'opération sont les mêmes que lors des essais de calibration à l'exception du niveau de boue qui est supérieur. La quantité de traceur de fer retrouvée après l'expérience est de 62,0 %. La fraction solide à la sousverse ainsi que les autres mesures expérimentales sont similaires à celles obtenues lors des essais de calibration. Le couple a cependant subi d'importantes variations durant l'essai. D'un point de vue théorique, lorsque le niveau de boue est haut, le temps de résidence est plus long que pour un niveau de boue normal. En supposant que le débit de sousverse est le même que celui obtenu au cours des essais de calibration 4, 5 et 6 (333 mL/min), le temps de résidence



prévu pour un volume de 70,0 L serait de 210,2 minutes. Selon la Figure 6.53, le temps de résidence moyen est de 110,0 minutes soit 52 % du temps de résidence initialement prévu. Le délai entre l'origine et la courbe est plus grand lorsque le niveau de boue est plus élevé (62,0 minutes versus 45,0 minutes). En effet, la distance à parcourir dans la portion de l'écoulement PFR est plus longue. La Figure 6.55 présente les courbes  $E(Z)$  obtenues pour un niveau de boue normal et plus élevé.



**Figure 6.55 – Courbe  $E(Z)$  pour un niveau de boue plus élevé**

La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est de 0,54 pour un haut niveau et de 0,66 pour un niveau normal. La diminution de la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  indique que l'écoulement de la boue est différent. En fait, la diminution de la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  dans un écoulement majoritairement

PFR est un indice de la présence d'un volume mort. Ainsi, le pourcentage de volume mort dans le décanteur est plus important que pour un niveau de boue normal. La quantité de fer manquante est probablement piégée dans le volume mort. Le Tableau 6.24 présente les paramètres de décomposition des courbes. On constate que l'emplacement des pics ( $Z_{\text{moyen}}$ ) est beaucoup plus rapproché que pour un niveau de boue normal. Conséquemment, les pics 1, 2, 3 et 5 représentent l'écoulement mais sur une portion du rayon du décanteur. Autrement dit, le volume mort se situe sur les pourtours du décanteur réduisant ainsi le rayon d'action du râteau. L'écoulement de la boue s'effectue donc dans un lit de boue plus mince et plus élevé. Par conséquent, la décomposition indique la nouvelle structure d'écoulement qui s'est formée dans le décanteur.

|               |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|---------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Niveau normal | N                  | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       |
|               | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,47    | 0,60    | 0,83    | 0,35    | 1,11    |
|               | Aire               | 40,4    | 24,0    | 14,7    | 3,6     | 15,2    |
| Haut niveau   | N                  | 6       | 4       | 5       | --      | 3       |
|               | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,39    | 0,47    | 0,57    | --      | 0,76    |
|               | Aire               | 41,5    | 19,4    | 14,7    | --      | 20,4    |

Tableau 6.24 – Paramètre de décomposition des courbes pour un haut niveau de boue

#### 6.4.9.2 Débit à la sousverse

Le débit à la sousverse a une incidence directe sur le temps de résidence du décanteur. En effet, le temps requis pour évacuer un même volume de boue, mais avec un débit de sousverse plus élevé, sera moindre. Les paramètres d'opération doivent être adaptés pour effectuer un essai de séparation solide/liquide avec un débit plus élevé à la sousverse. Par conséquent, un seul essai de variation de débit a été effectué. Les nouvelles conditions d'opération sont : une alimentation de 75,0 g/L, un volume dans le décanteur de 50,0 L et un débit à la sousverse de 500 mL/min. La Figure 6.56 présente les courbes  $E(Z)$  obtenues pour un débit à la sousverse standard de 300 mL/min et pour un débit de 500 mL/min.

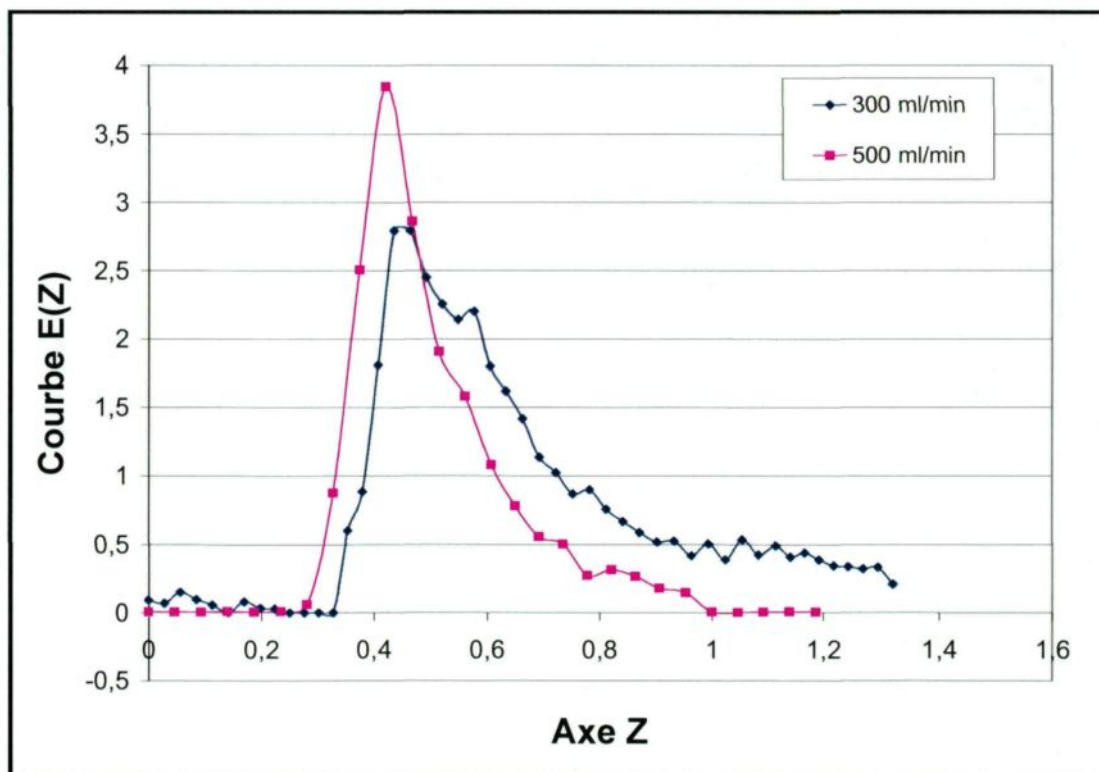


Figure 6.56 – Courbe  $E(Z)$  pour une variation de débit à la sousverse



Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont de 0,51 pour le débit de 500 ml/min et 0,65 pour le débit de 300 ml/min. Les temps de résidence associés sont de 49,6 min et 89,0 min. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  et de  $\tau$  sont plus petites lorsque le débit est plus élevé. On observe cependant que les courbes obtenues sont différentes. Les décompositions en pics sont présentées au Tableau 6.25. Dans les deux cas, les pics 1, 2, 3 et 4 sont centrés ( $Z_{\text{moyen}}$ ) aux mêmes endroits. Les types d'écoulement (N) les traversant sont également similaires. La principale différence provient des quantités (Aire) traitées par chacun des pics. Pour la courbe de 500 mL/min, le pic 1 est plus actif tandis que le pic 5 est inexistant. En somme, lorsque le débit de sousverse est plus élevé, la zone centrale est beaucoup plus active et le transport de la boue sous l'action des râtaux est moins efficace et il se forme des zones mortes près des parois du décanteur.

|                                      |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|--------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Débit standard<br/>300 mL/min</b> | N                  | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|                                      | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|                                      | Aire               | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| <b>Débit élevé<br/>500 mL/min</b>    | N                  | 7       | 4       | 3       | 14      | --      |
|                                      | $Z_{\text{moyen}}$ | 0,45    | 0,62    | 0,82    | 0,34    | --      |
|                                      | Aire               | 68,5    | 19,6    | 7,6     | 4,2     | --      |

**Tableau 6.25 – Paramètre de décomposition pour une variation de débit**

#### 6.4.9.3 Floculation

Le processus de floculation peut influencer la structure du lit de boue ainsi que l'écoulement de cette dernière. Le contrôle de la floculation s'effectue selon plusieurs paramètres : type de floculant, concentration du floculant, dosage du floculant, mode d'injection ainsi que du niveau d'agitation de la suspension floculée. Tel que spécifié au Chapitre 5, plusieurs paramètres sont maintenus constants afin de limiter le nombre d'essais à réaliser. Ainsi, seul des essais de variation du dosage ont été effectués. Les dosages étudiés sont de 60 gpt, 100 gpt et 130 gpt. La Figure 6.57 présente les trois courbes  $E(Z)$  obtenues.

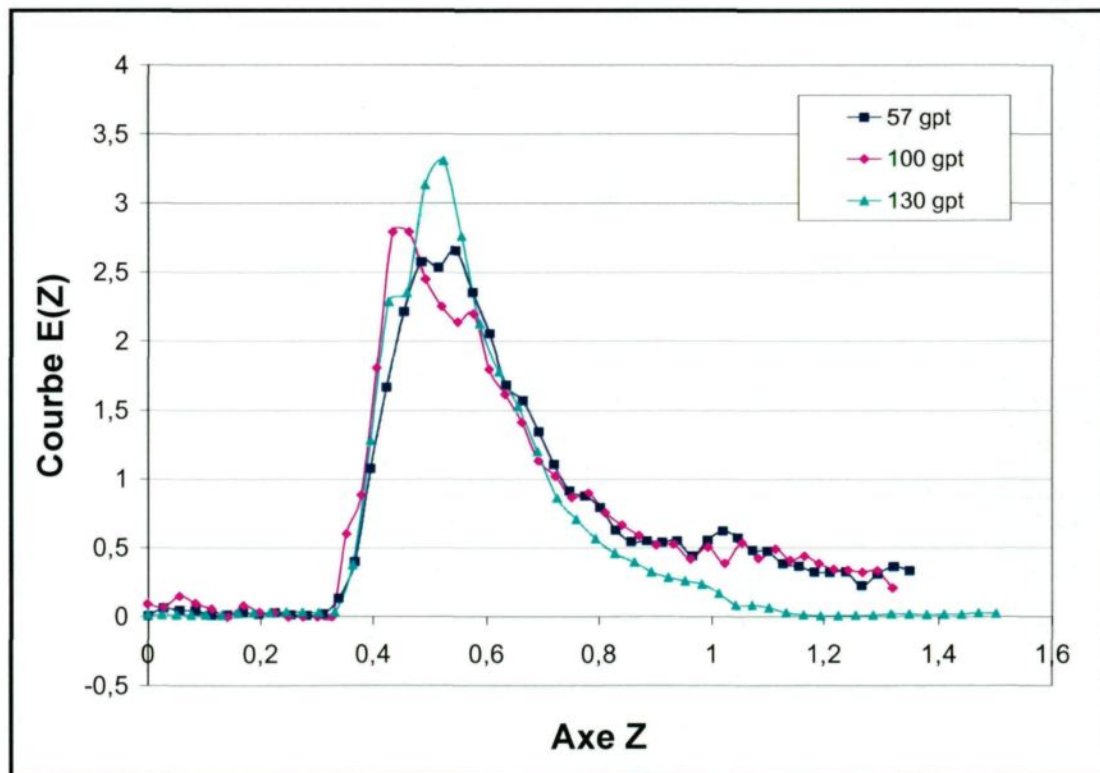


Figure 6.57 – Courbes  $E(Z)$  pour des variations de dosage

Les fractions solides obtenues pour chacun des essais sont de 49,2 % p/p, 53,5 % p/p et 53,8 % p/p. Ainsi, l'augmentation du dosage favorise l'augmentation de la fraction solide jusqu'à ce que la quantité supplémentaire de floculant ajoutée n'a plus d'incidence sur le pourcentage solide de la boue à la sousverse. Le couple s'est stabilisé à 160 pour 60 gpt, 200 pour 100 gpt et 220 pour 130 gpt. Le couple est moins élevé à bas dosage puisque la fraction solide est moindre. À l'inverse, la valeur du couple plus élevée à 130 gpt ne peut être attribuée à la faible augmentation de la fraction solide. La quantité de floculant supplémentaire ajouté augmente la viscosité de la boue et favorise l'agglomération de la boue sur les structures du râteau ou sur les parois (le surplus de floculant agit comme une colle). Ce phénomène a déjà été observé pour des essais de floculation de la boue rouge dans un système Couette<sup>(28)</sup>. La décomposition en pics est présentée au Tableau 6.26.

|         |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|---------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 60 gpt  | N                  | 9       | 4       | 3       | 14      | 3       |
|         | Z <sub>moyen</sub> | 0,51    | 0,67    | 0,89    | 0,40    | 1,12    |
|         | Aire               | 41,8    | 26,4    | 15,0    | 3,6     | 8,9     |
| 100 gpt | N                  | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|         | Z <sub>moyen</sub> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|         | Aire               | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| 130 gpt | N                  | 18      | 7       | 2       | --      | --      |
|         | Z <sub>moyen</sub> | 0,42    | 0,54    | 0,81    | --      | --      |
|         | Aire               | 9,2     | 70,2    | 21,1    | --      | --      |

Tableau 6.26 – Paramètre de décomposition pour une variation de dosage

Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont respectivement de 0,68, 0,65 et 0,59. Les temps de résidence associés sont de 88,7 min, 89,0 min et 73,3 min. Entre les courbes de 60 gpt et 100 gpt, on observe très peu de différence. En effet, les pics de décomposition 2, 3, 4 et 5 sont similaires à ceux obtenus pour les essais de calibration 1, 2 et 3. On observe cependant des variations pour le premier pic. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  de ce pic est légèrement plus élevée (0,51 plutôt que 0,48) et le type d'écoulement s'y produisant est plus près d'un écoulement PFR (9 plutôt que 6). Ainsi, l'écoulement de la boue dans la zone centrale est moins affecté par la zone de mélange du râteau (moins de déformation du pic) et elle s'effectue « plus lentement » (plus de matière doit être évacuée avant de voir apparaître le pic).

L'écoulement de la courbe à 130 gpt est beaucoup plus différent. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  et  $\tau$  sont inférieures confirmant ainsi la présence de volume mort dans l'écoulement. En effet, l'absence du pic 5 et la modification de l'écoulement dans le pic 3 confirme qu'il y a peu de matériel en provenance de la zone près des parois du décanteur. Par conséquent, la zone d'écoulement près des parois est très lente, voire morte. Ainsi, l'écoulement de la boue doit principalement s'effectuer dans les zones centrales. En effet, la quantité de matériel traitée par le pic 2 est beaucoup plus importante (70,2 % plutôt que 26,4 %). L'écoulement dans la zone à  $r = 0$  (pic 1) est moins important. Il est possible que l'amas de boue plus floculée qui s'accumule sur les structures du râteau dans cette zone soit très important déviant ainsi l'écoulement du centre vers la zone à 0,5 r.

En somme, l'augmentation du dosage au-delà d'un certain seuil n'améliore pas la fraction solide de la boue. De plus, un dosage plus important favorise la création de zone morte dans l'écoulement réduisant ainsi l'efficacité du décanteur. À l'inverse, un dosage moins élevé diminue la fraction solide à la sousverse, ce qui est un désavantage pour l'industrie. Bref, les essais confirment l'influence du dosage sur l'écoulement de la boue dans le décanteur.

#### ***6.4.10 Simulation de problèmes***

L'objectif initial de ce projet est de développer une méthode de traçage permettant d'identifier des problématiques à l'intérieur des décanteurs. Jusqu'à maintenant, la méthode de mesure du traceur de fer a été validée et est particulièrement efficace pour caractériser le déplacement de la boue dans un décanteur. Une méthode d'analyse basée sur la décomposition en pics a permis de décrire les écoulements de la boue à l'intérieur du décanteur. Les facteurs influençant la RTD ont également été étudiés. La prochaine étape consiste donc à simuler des problématiques se produisant à l'intérieur des décanteurs industriels pour vérifier si elles possèdent des signatures typiques apparaissant sur la RTD. Trois principaux problèmes sont à l'étude : la formation de court-circuit au centre du décanteur et communément appelé « rat hole », la présence de volume mort dans le lit de boue et l'entartrage des râteaux.



#### **6.4.10.1 Court-circuit dans l'écoulement**

Le court-circuit dans l'écoulement est un problème important se produisant à l'intérieur des décanteurs industriels. Ceux-ci se forment lorsque la boue, due à sa viscosité, s'agglomère sur les lames du râteau au pourtour de la sousverse. L'amas de boue ainsi formé augmente de volume et agit comme un tuyau. Conséquemment, la boue moins compactée des zones supérieures est directement pompée vers la sousverse. Pour les opérateurs, les indices d'un court-circuit sont une diminution de la fraction solide à la sousverse et une augmentation du couple du râteau. Ces indices apparaissent principalement une fois le court-circuit établi. Il serait souhaitable de déceler la formation d'un court-circuit avant qu'il ne soit trop important. Deux types de court-circuit ont été étudiés : un court-circuit complet du lit de boue et un demi court-circuit. Notons que la courbe  $E(Z)$  n'est pas présentée pour ces essais puisqu'il est difficile d'évaluer le volume actif du décanteur. Seules les courbes  $E(t)$  sont présentées.

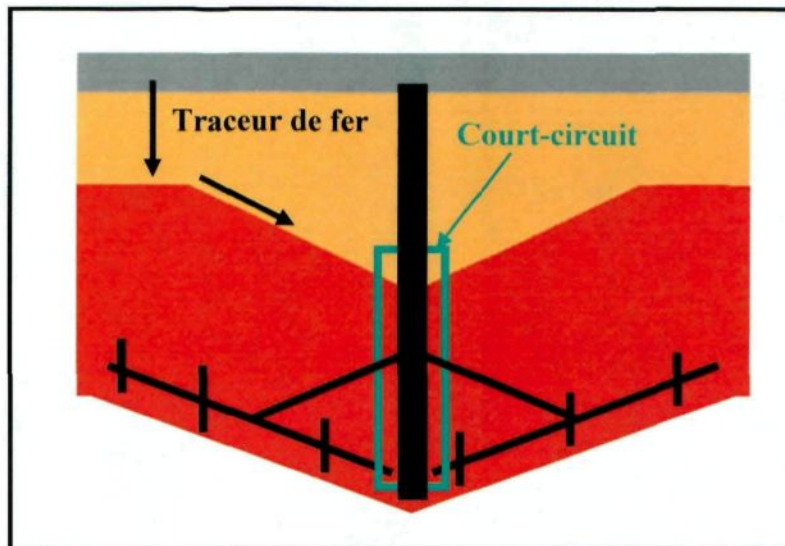
##### **6.4.10.1.1 Court-circuit complet**

Le premier essai étudie un court-circuit complet du lit de boue du décanteur dans des conditions d'opération normales. Pour se faire, un cylindre creux a été ajouté sur l'arbre de rotation du râteau. La hauteur du cylindre est équivalente à la hauteur du lit de boue. Une chicane a été ajoutée sur le dessus du cylindre pour éviter que les agrégats et le traceur de fer ne tombent directement à l'intérieur. La Figure 6.58 présente le montage du court-circuit sur le râteau.



**Figure 6.58 – Court-circuit complet du lit de boue**

Les paramètres d'opération de cet essai sont similaires à ceux précédemment décrits. Certaines mesures obtenues sont cependant bien différentes. Ainsi, la hauteur du lit de boue est supérieure comparativement à un essai standard (30,5 cm plutôt que 21,0 cm). En effet, pour que la boue puisse s'écouler à l'intérieur du décanteur, celle-ci doit être plus élevée que la hauteur du court-circuit. La structure du lit est alors différente. En effet, il se forme une dénivellation importante (environ 10,0 cm) entre le centre du décanteur et les pourtours. Ce phénomène est caractéristique d'un écoulement avec un court-circuit. Par conséquent, lorsque le traceur de fer est injecté via l'alimentation, il se dépose sur le lit et s'écoule sur la surface du lit vers le centre du décanteur. La Figure 6.59 illustre l'effet d'un court-circuit complet sur le lit de boue.



**Figure 6.59 – Court-circuit complet du lit de boue**

Une autre caractéristique importante observée est que la fraction solide à la sousverse est moins élevée (20,1 % p/p plutôt que 53,1 % p/p). En effet, la quantité de matériel circulant à l'intérieur du court-circuit est moindre. Le débit à la sousverse est quant à lui plus important (560 mL/min plutôt que 308 mL/min). La stabilité du couple a été plus longue à obtenir que pour un essai standard. Ceci peut s'expliquer par le fait que la structure du lit est complètement différente. La valeur du couple stabilisé est d'environ 200. Normalement, cette valeur devrait être supérieure, mais puisque le montage du court-circuit est fait à partir d'un tuyau ABS léger, le poids associé au court-circuit n'est pas représentatif de la réalité.

La trace obtenue suite à cet essai de traçage est celle du court-circuit. D'un point de vue théorique, la trace devrait apparaître plus rapidement que pour un essai de calibration.

En fait, la portion active du lit est principalement le court-circuit tandis que tout le reste du lit agit plus ou moins comme une zone morte. La Figure 6.60 présente les courbes  $E(t)$  obtenues pour les deux types de court-circuit. La quantité de fer retrouvée pour le court-circuit complet est de 98,8 %. La valeur du temps de résidence moyen est de 25,1 minutes. On constate donc que pour cet essai, le fer est détecté immédiatement après l'injection. La trace associée à ce court-circuit est très différente de celles observées précédemment. La signature de cette courbe est conforme à la théorie des courts-circuits.

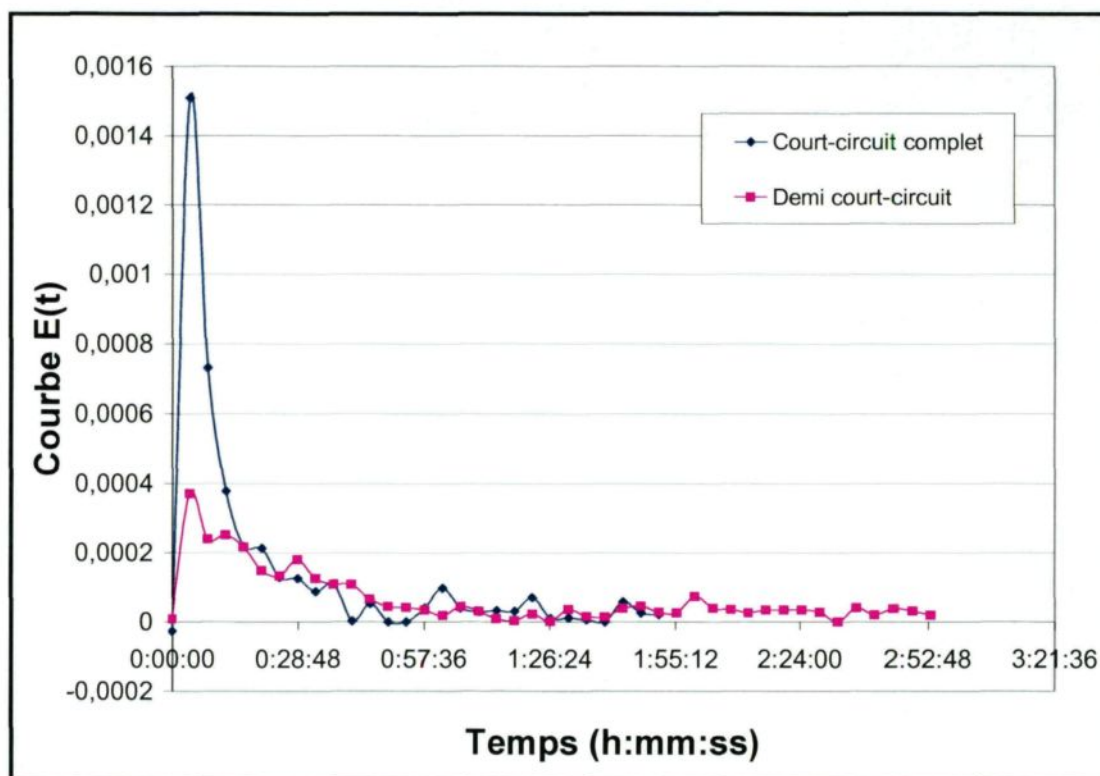
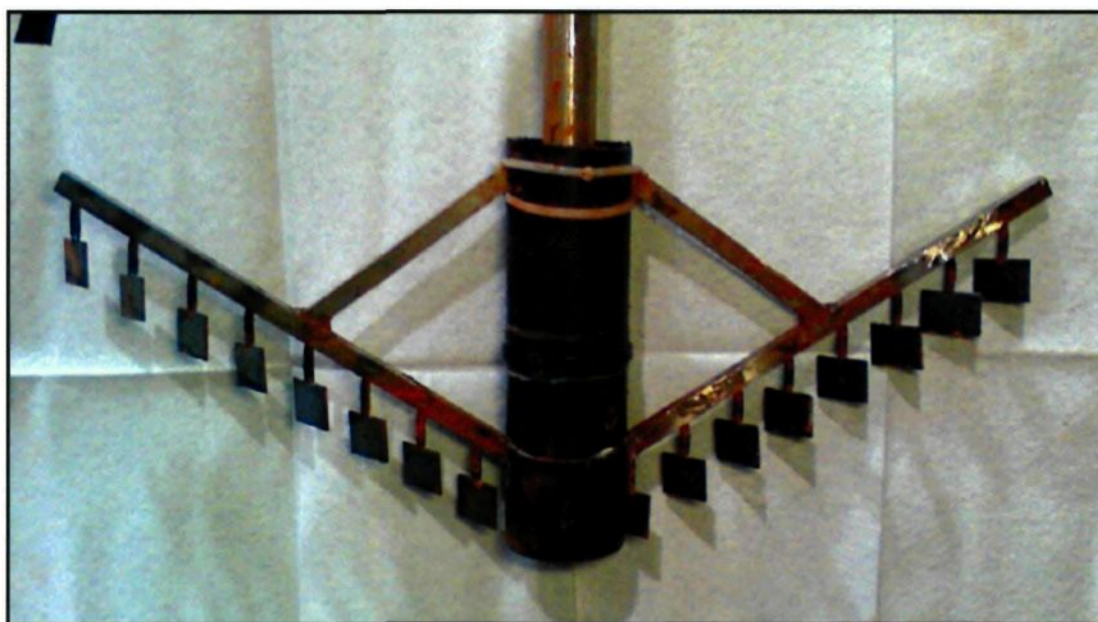


Figure 6.60 – Courbes  $E(t)$  de court-circuit de l'écoulement



#### 6.4.10.1.2 Demi court-circuit

Le court-circuit complet permet d'observer les effets du cas limite extrême sur la signature du décanteur. Le demi court-circuit est plus représentatif de la réalité. Le demi court-circuit est fabriqué comme le court-circuit complet. Seule la hauteur est différente (moitié moins long). Ainsi, la boue de sousverse provient d'une couche supérieure du lit de boue. La Figure 6.61 présente le demi court-circuit utilisé. Les effets du demi court-circuit sur le lit de boue sont les mêmes que ceux observés précédemment c'est-à-dire qu'une dénivellation est observée entre le centre et les parois (environ 5,0 cm). Par conséquent, le traceur de fer devrait suivre le même écoulement.



**Figure 6.61 – Demi court-circuit**

La quantité de fer retrouvée après l'expérimentation est de 54,0 %. Il est probable que la portion manquante du traceur de fer soit dans les zones mortes sur les pourtours du

court-circuit. Le temps de résidence est de 37, 4 minutes. La fraction solide à la sousverse est de 37,9 % p/p. Le débit associé est de 450 mL/min. Le niveau de boue moyen est de 24,5 cm. Le couple s'est stabilisé à une valeur de 240. La courbe obtenue pour le demi court-circuit (Figure 6.60) est d'amplitude moins élevée que celle du court-circuit complet mais la signature de la trace est la même. Conséquemment, il est possible de détecter la présence d'un court-circuit dans l'écoulement.

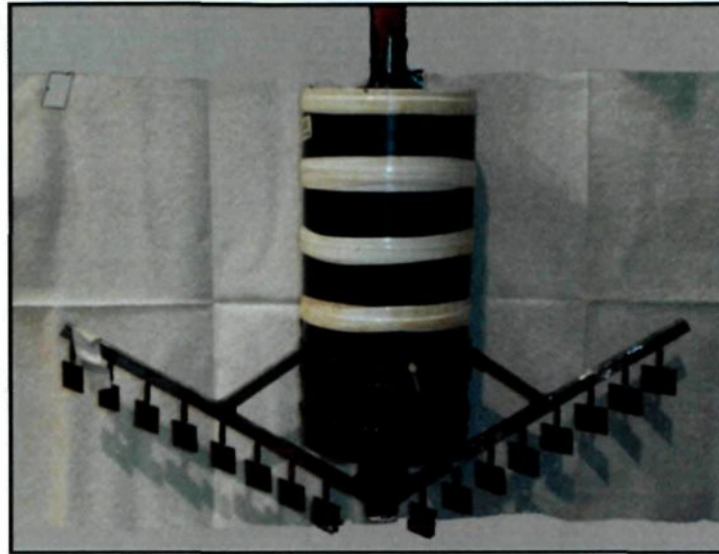
#### **6.4.10.2 *Volume mort***

La présence d'un volume mort dans l'écoulement de la boue signifie qu'une portion du décanteur n'est pas utilisée. Trois types de volumes morts ont été étudiés : près du centre ( $r = 0$ ), à mi-rayon ( $r = 0,5 r$ ) et près des parois ( $r = r$ ). Les volumes morts sont recréés en introduisant dans le décanteur une structure en anneau composée de métal et de bois. Trois structures ont donc été construites. Mentionnons que les structures sont adaptées pour que le bas de l'anneau soit juste au-dessus des râteaux. Par conséquent, la hauteur des volumes morts est différente en fonction de l'emplacement.

##### **6.4.10.2.1 *Volume mort près du centre***

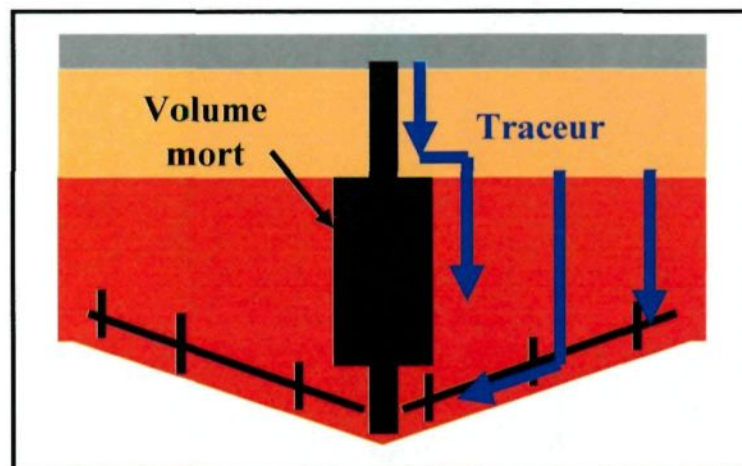
Le volume mort près du centre est recréé en ajoutant une structure cylindrique sur l'arbre de rotation du râteau. Cette structure est fermée aux extrémités. La Figure 6.62 présente le montage simulant un volume mort près du centre. Les dimensions sont de 13,0 cm de diamètre par 26,0 cm de hauteur. Le volume mort est donc de 3,5 L. Les paramètres d'opération sont les mêmes que ceux des essais de calibration. Ainsi, pour les 50,0 L de

boue présents normalement dans le décanteur, 46,5 L sont réellement actifs. Les valeurs de  $\tau$  et de  $Z_{\text{moyen}}$  sont donc théoriquement inférieures.



**Figure 6.62 – Volume mort au centre du décanteur**

D'un point de vue théorique, le traceur de fer qui tombe dans la section centrale sera retardé et/ou dévié vers la zone de  $0,5 r$ . La Figure 6.63 illustre l'écoulement théorique de la boue lorsqu'il y a présence d'un volume mort au centre du décanteur.



**Figure 6.63 – Écoulement de la boue avec un volume mort à  $r = 0$**

La courbe  $E(Z)$  obtenue pour un volume mort au centre du décanteur est présentée à la Figure 6.64. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est de 0,47 et la valeur de  $\tau$  est de 62,6 min. On observe la présence d'un léger délai entre les deux courbes. En effet, la courbe de volume mort apparaît plus rapidement que celle de l'écoulement global. En fait, la zone centrale du décanteur est celle qui est normalement la plus active. En obstruant cette portion de l'écoulement, la zone à  $0,5 r$  est alors devenue très active tandis que celle près de la paroi est restée lente. Il s'est alors formé une dénivellation (environ 4,0 cm) à la surface du lit entre la zone à  $0,5 r$  et à  $r$ . Par conséquent, lorsque le fer a été injecté via l'alimentation, la quantité qui a été déposée dans la zone à  $0,5 r$  est sortie plus rapidement puisque le lit de boue était moins épais (l'écoulement dans la zone PFR était moins long que d'habitude).

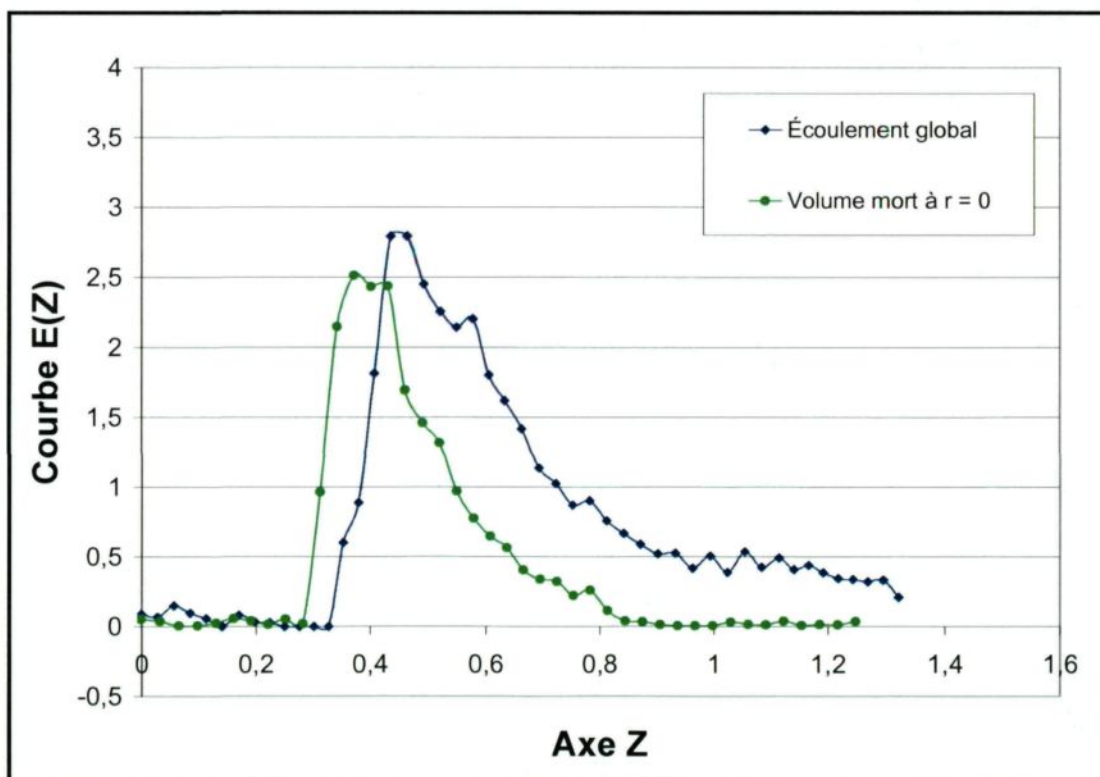


Figure 6.64 – Courbe  $E(Z)$  pour un volume mort près du centre



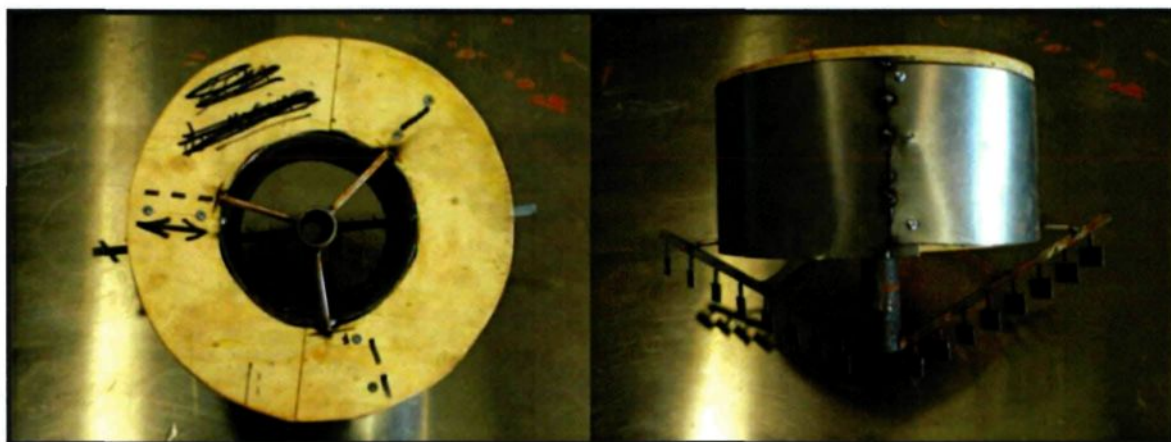
Les paramètres de décomposition sont présentés au Tableau 6.27. Les pics, 1, 2 et 4 de la RTD avec volume mort apparaissent tous plus rapidement que le pic 1 de la RTD de l'écoulement global confirmant ainsi que la zone à 0,5 r est devenue très active. Le pic 3 de l'écoulement avec volume mort, de par son emplacement ( $Z_{\text{moyen}}$ ), est également associé à l'écoulement à travers la zone à 0,5 r. Par conséquent, aucun pic n'est associé à l'écoulement de la zone près des parois. Soit le temps d'expérimentation n'a pas été suffisamment long pour permettre d'observer le passage du traceur qui est tombé dans cette portion, soit cette zone est devenue encore plus lente et presque morte. La quantité de traceur retrouvée après l'expérimentation est de 57,9 %. Ainsi, près de la moitié du traceur est toujours piégée à l'intérieur du décanteur. En somme, la présence de volume mort au centre du décanteur peut être détectée grâce à l'apparition précoce de la RTD.

|  |                                      | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|--|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Écoulement global</b>               | <b>N</b>                             | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|  | <b><math>Z_{\text{moyen}}</math></b> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|  | <b>Aire</b>                          | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| <b>Zone morte à <math>r = 0</math></b> | <b>N</b>                             | 6       | 3       | 3       | 12      | --      |
|  | <b><math>Z_{\text{moyen}}</math></b> | 0,39    | 0,48    | 0,62    | 0,32    | --      |
|  | <b>Aire</b>                          | 44,4    | 28,9    | 15,6    | 4,9     | --      |

**Tableau 6.27– Paramètres de décomposition d'un volume mort à  $r = 0$**

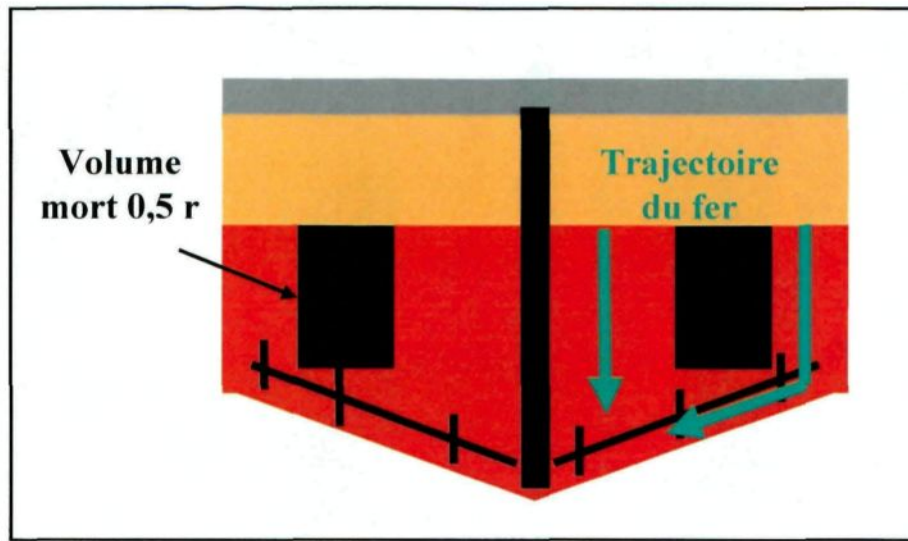
#### 6.4.10.2.2 *Volume mort à mi-rayon*

Le volume mort à mi-rayon du décanteur est représenté par un anneau de 32,0 cm de diamètre externe, de 15,5 cm de diamètre interne et d'une hauteur de 16,5 cm. La structure occupe un volume de 10,16 L. La Figure 6.65 présente une vue de profil et de face de la structure ajoutée sur l'arbre de rotation du râteau pour simuler le volume mort à 0,5 r. Les paramètres d'opération sont les mêmes que lors des essais de calibration. La concentration solide à la sousverse obtenue est de 51,3 % p/p.



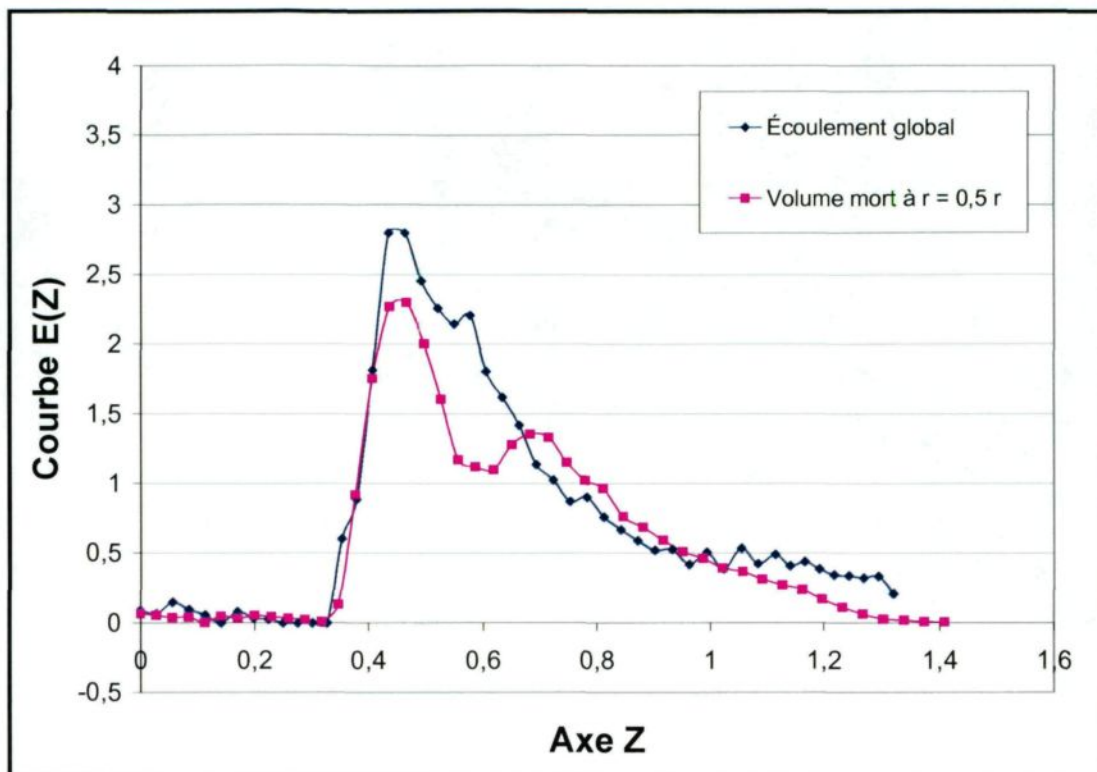
**Figure 6.65 – Volume mort à mi-rayon**

Puisque la zone à 0,5 r ne peut pas être alimentée, le traceur de fer doit circuler au voisinage de la paroi et du centre du décanteur. La trajectoire du fer est présentée à la Figure 6.66.



**Figure 6.66 – Écoulement de la boue avec une zone morte à  $0,5 r$**

Selon l'analyse de la décomposition des essais de calibration, le second pic est associé à l'écoulement de la boue provenant de la zone à  $0,5 r$ . Par conséquent, la signature typique d'un volume mort à  $0,5 r$  serait représentée par l'absence de ce second pic. La Figure 6.67 présente la courbe  $E(Z)$  expérimentale obtenue pour cet essai de traçage ainsi que celle obtenue lors d'essais de calibration. La quantité de fer retrouvée après l'expérimentation est de 83,1 %. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont de 0,65 pour l'écoulement avec volume mort et 0,65 pour l'écoulement global. Les valeurs de  $\tau$  sont respectivement de 90,0 minutes et 89,0 minutes. Les courbes sont donc représentatives du même écoulement mais avec des variations dans la section autour de  $0,5 r$ .



**Figure 6.67 – Courbe  $E(Z)$  d'un écoulement avec une zone morte à  $0,5 r$**

Les paramètres de décomposition des courbes sont présentés au Tableau 6.28. Le premier pic est identique pour les deux courbes. Le second pic de l'écoulement global est complètement absent de l'écoulement avec volume mort à  $0,5 r$ . Les pics 3 et 5 sont associés à l'écoulement de la boue de la zone près des parois. La quantité de matériels circulant dans cette zone est beaucoup plus importante que lors d'un essai standard (43,3 % plutôt que 20,9%). Ce comportement est normal puisque l'écoulement global doit se répartir sur moins de surface. Le pic 4 n'apparaît pas puisqu'il est associé à un court-circuit dans la zone à  $0,5 r$ . En somme, il est facile de déterminer l'existence d'un volume mort à  $0,5 r$  dans un décanteur.



|                    |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|--------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Écoulement global  | N                  | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|                    | Z <sub>moyen</sub> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|                    | Aire               | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| Zone morte à 0,5 r | N                  | 5       | --      | 3       | --      | 3       |
|                    | Z <sub>moyen</sub> | 0,48    | --      | 0,78    | --      | 1,13    |
|                    | Aire               | 45,2    | --      | 43,3    | --      | 8,3     |

Tableau 6.28 – Paramètres de décomposition d'un volume mort à 0,5 r

#### 6.4.10.2.3 Volume mort près de la paroi

Le volume mort est simulé à l'aide d'une structure cylindrique de 48,0 cm de diamètre externe, 31,5 cm de diamètre interne et de 12,0 cm de haut. Cette structure occupe un volume de 12,4 L. La Figure 6.68 présente la structure ajoutée pour simuler un volume mort à  $r = r$ . L'ajout de cette structure a comme principal effet de diminuer la taille de notre décanteur. En effet, l'écoulement de la boue s'effectue de la même façon pour les zones centrales ( $r = 0$  et  $0,5 r$ ) mais aucun écoulement de la boue ne provient des zones près de la paroi. Autrement dit, c'est comme si on effectue l'essai de traçage mais dans un décanteur plus mince. La Figure 6.69 illustre l'écoulement attendu de la boue dans le décanteur lorsqu'il y a présence d'un volume mort à  $r = r$ .



Figure 6.68 – Volume mort près de la paroi

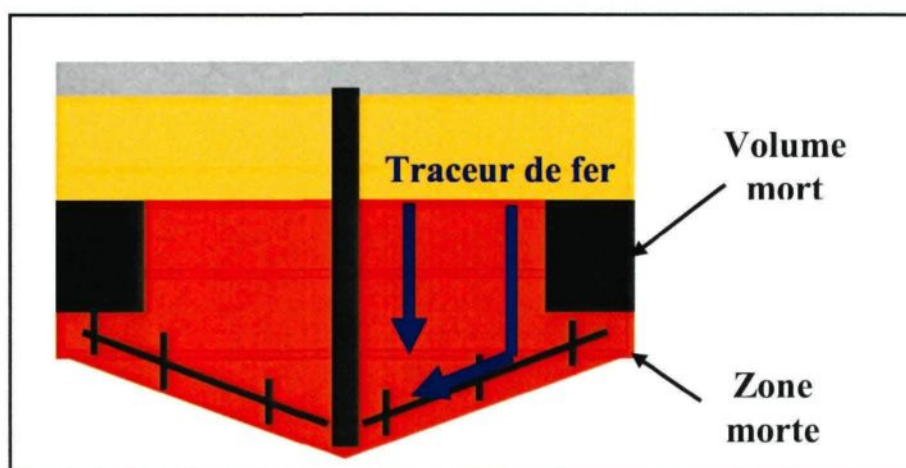
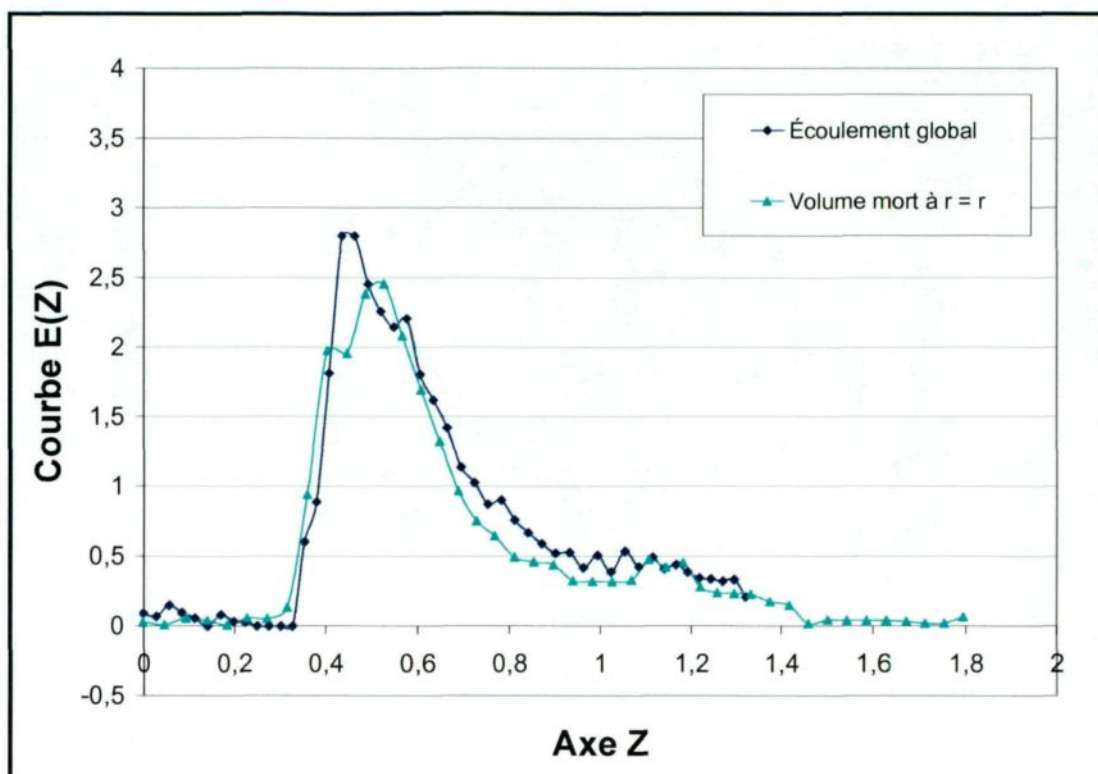


Figure 6.69 – Écoulement de la boue avec une zone morte à  $r = r$

La Figure 6.70 présente la courbe  $E(Z)$  obtenue pour un écoulement de la boue avec un volume mort à  $r$ . La quantité de fer retrouvée après l'essai est de 98,7 %.



**Figure 6.70 – Courbe  $E(Z)$  d'un écoulement avec volume mort à  $r$**

Globalement, les courbes se ressemblent. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont de 0,67 pour le volume mort et 0,65 pour l'écoulement global. Les temps de résidence moyens associés sont de 70,7 min et 89,0 min. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont similaires car les courbes  $E(Z)$  permettent de comparer l'écoulement de décanteur de différentes tailles. Les valeurs de  $\tau$  indiquent cependant que le volume actif du décanteur est plus petit. Les paramètres de décomposition sont présentés au Tableau 6.29. On constate que le court-circuit (pic 4) est plus important (14,4 % plutôt que 3,2 %) dans cet écoulement. Les pics 2 et 3 de l'écoulement avec une zone morte ressemblent plus aux pics 3 et 5 de l'écoulement global. En somme, l'écoulement dans un décanteur plus mince à la même structure que celui dans



un décanteur plus large. La présence de volume mort en périphérie est observable par le temps de résidence plus court.

|                          |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|--------------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Écoulement global</b> | <b>N</b>                 | 6       | 5       | 3       | 18      | 3       |
|                          | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,48    | 0,63    | 0,89    | 0,36    | 1,19    |
|                          | <b>Aire</b>              | 40,5    | 25,1    | 20,9    | 3,2     | 8,3     |
| <b>Zone morte à r</b>    | <b>N</b>                 | 3       | 3       | 4       | 10      | --      |
|                          | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,56    | 0,83    | 1,21    | 0,40    | --      |
|                          | <b>Aire</b>              | 52,1    | 13,5    | 16,6    | 14,4    | --      |

**Tableau 6.29 – Paramètres de décomposition pour un volume mort près de la paroi**

#### **6.4.10.3 Les râteaux**

Les râteaux sont nécessaires pour aider à l'écoulement de la boue dans les décanteurs et pour augmenter la fraction solide à la sousverse. Sans eux, le processus de séparation solide/liquide ne serait pas aussi efficace. Par contre, les râteaux peuvent également occasionner des problèmes. En effet, la plupart des râteaux deviennent entartrés (accumulation de boue sur les structures du râteau et des lames) au bout d'un certain temps d'utilisation. L'entartrage diminue considérablement l'efficacité du processus de séparation solide/liquide et, dans certains cas, provoque l'arrêt prématuré du décanteur pour un nettoyage. Présentement, la mesure du couple permet de détecter l'entartrage du râteau en milieu industriel. En effet, l'accumulation de boue sur les lames du râteau favorise l'augmentation du couple. Par conséquent, il serait pertinent de pouvoir évaluer



l'écoulement du râteau et de détecter l'apparition de problèmes. Selon les résultats d'un essai de traçage exploratoire dans un décanteur industriel<sup>(1)</sup>, il serait possible de détecter le passage des râteaux. Ainsi, quelques problématiques liées aux râteaux sont simulées afin d'en observer les effets sur la RTD. Au nombre des essais, on retrouve : l'entartrage partiel des lames, l'obstruction complète des lames ou « gratte », l'obstruction des lames et des structures du râteau ainsi que l'obstruction complète du lit de boue. Spécifions que les essais ont été réalisés avec le second type de boue. Par conséquent, les courbes expérimentales sont comparées avec celles des essais de calibration 4, 5 et 6.

#### **6.4.10.3.1 Détection du râteau**

La première étape de ces essais de simulation consiste à observer s'il est effectivement possible de détecter le passage des lames. Selon certains chercheurs<sup>(1)(3)</sup>, le passage du râteau se caractérise par la présence de pics périodiques sur la courbe RTD correspondant à la fréquence de rotation du râteau. La Figure 6.71 présente une courbe expérimentale obtenue par ces chercheurs ainsi que la présence des pics périodiques. Par conséquent, il est important de valider si le passage du râteau est signalé sur les courbes de RTD expérimentales obtenues. Considérons la courbe de calibration 1 avant lissage (Figure 6.2). En agrandissant l'échelle de temps pour une section de la trace, on observe la présence de très petits pics. Une analyse de l'emplacement de ces pics indique qu'ils apparaissent de façon plus ou moins aléatoires. En effet, le delta temps entre ces pics oscille entre 80,0 et 160,0 sec. Par conséquent, ces pics ne peuvent être associés au passage du râteau.

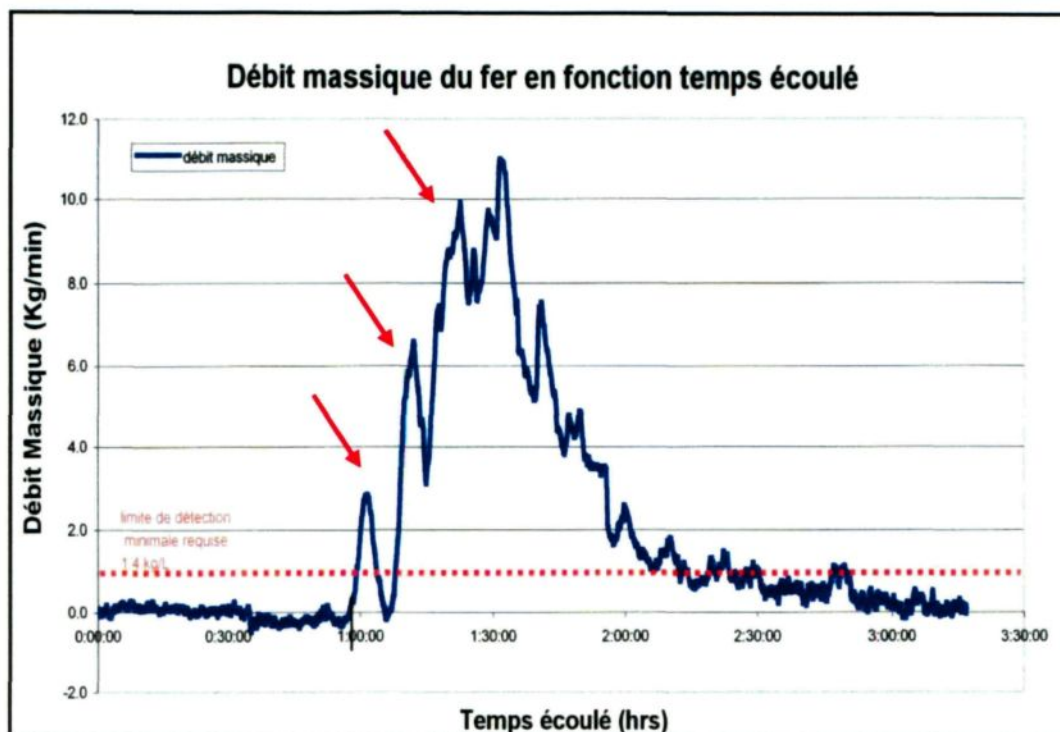


Figure 6.71 – RTD d'un essai de traçage dans un décanteur industriel

#### 6.4.10.3.1.1 *Surdose de fer*

Puisque le passage du râteau n'est pas détecté, il est possible que ce soit parce que la quantité de fer injectée n'est pas suffisante. Par conséquent, un essai de surdose de fer a été effectué. Une quantité de fer vingt fois plus grande a été injectée. La courbe expérimentale obtenue n'est pas présentée car le passage du râteau n'y est pas apparent.

#### 6.4.10.3.1.2 *Déplacement du puits de sousverse*

La configuration centrée du puits de sousverse a été utilisée pour effectuer tous les essais de traçage réalisés jusqu'à maintenant. Bien évidemment, cette configuration n'est pas optimale pour détecter le passage du râteau. Par conséquent, un essai de traçage a été

réalisé en déplaçant la sousverse dans une position à  $0,5 r$  à l'opposé du puits d'alimentation. Encore une fois, le passage du râteau n'a pas été détecté. En fait, il est possible que l'espacement entre les lames du râteau soit trop petit pour observer une modulation de la courbe RTD. En effet, tous les paramètres physiques du décanteur expérimental ont été réduits à l'exception de la taille des particules de boue. Conséquemment, l'interaction entre les particules et les lames du râteau n'est pas respectée empêchant ainsi la détection du râteau. Autrement dit, les pics observés sont représentatifs des variations de fraction solide de la boue entre deux lames. Il serait important de valider cette hypothèse en effectuant d'autres essais de traçage dans un décanteur industriel.

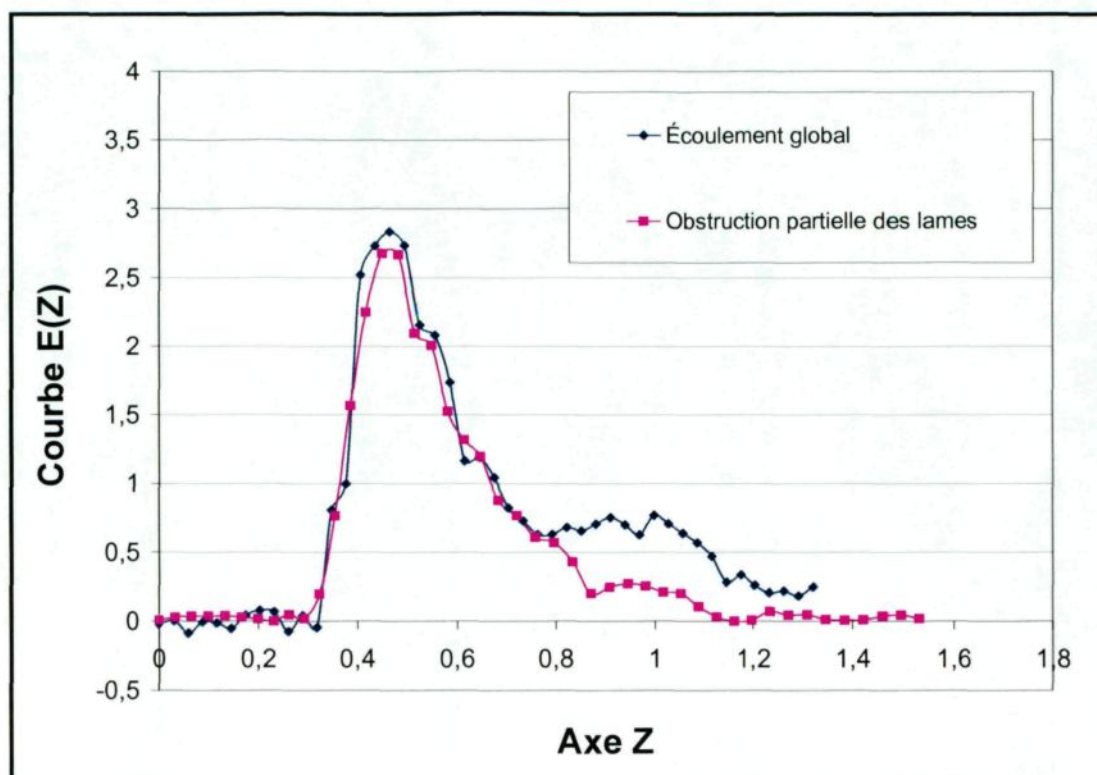
#### ***6.4.10.3.2 Obstruction partielle des lames***

L'obstruction partielle des lames représente le cas où il y a un entartrage sur les lames du râteau. Ceci a pour effet de diminuer l'espacement entre les lames. La diminution peut être de l'ordre de quelques millimètres à plusieurs centimètres. La limite extrême étant une obstruction complète de l'espace entre les lames. L'obstruction partielle des lames est simulée en ajoutant des gaines de téflon sur chacune des lames. Les gaines ont été machinées afin que l'espacement entre les lames soit diminué de moitié. La forme de la gaine est profilée afin de simuler un entartrage réel des lames. La Figure 6.72 présente les gaines ajoutées sur les lames.



**Figure 6.72 – Obstruction partielle des lames**

Les paramètres d'opération sont les mêmes que précédemment. La Figure 6.73 présente la courbe  $E(Z)$  obtenue. Une analyse visuelle permet de constater que les premières parties des courbes sont similaires mais que l'écoulement associé à la zone près de la paroi est très différent. La quantité de fer retrouvée est de 76,8 %. La fraction solide à la sousverse est comparable à celles des essais de calibration (48,9 %). La mesure du couple s'est cependant stabilisée à une valeur supérieure (200 plutôt que 170). La mesure du couple est supérieure, due à la présence des gaines sur les lames. D'un point de vue théorique, l'ajout des gaines devrait augmenter la quantité de volume mort dans l'écoulement et se traduire par une diminution de la valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  et  $\tau$ . La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est de 0,58 pour l'obstruction partielle et de 0,66 pour l'écoulement global indiquant ainsi la présence d'un volume mort plus important dans l'écoulement de la boue. Les valeurs de  $\tau$  sont respectivement de 72,4 min et 85,0 min confirmant ainsi la présence d'un volume mort plus important dans le cône.



**Figure 6.73 – Courbe  $E(Z)$  pour une obstruction partielle des lames**

Les paramètres de décomposition sont présentés au Tableau 6.30. L'emplacement ( $Z_{\text{moyen}}$ ) de chacun des pics est le même ; donc, les pics de décompositions correspondent aux mêmes zones. On observe cependant une diminution importante de la quantité de matériaux traitée (Aire) par la zone près de la paroi (pic 3 et 5). En effet, il est possible que l'entartrage des lames diminue l'efficacité de transport du râteau et par conséquent, le transfert de la boue des parois vers le centre est plus faible. Ainsi, l'écoulement près des parois est beaucoup moins actif que pour un essai standard. La zone active (pic 1 et 4) est beaucoup plus importante pour compenser la perte d'efficacité des lames. En somme, il est



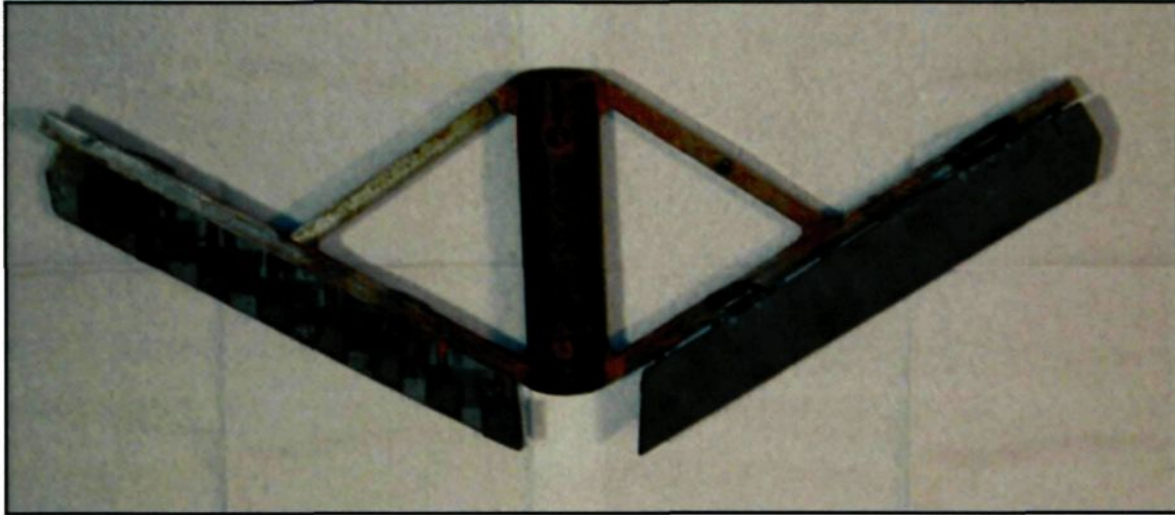
possible de détecter l'accumulation de boue sur les lames du râteau lorsque celle-ci est suffisamment importante pour créer une variation dans l'écoulement de la boue.

|  |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 |
|--|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Écoulement global</b>               | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       |
|  | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,47    | 0,60    | 0,83    | 0,35    | 1,11    |
|  | <b>Aire</b>              | 40,4    | 24,0    | 14,7    | 3,6     | 15,2    |
| <b>Obstruction partielle des lames</b> | <b>N</b>                 | 7       | 3       | 4       | 8       | 3       |
|  | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,49    | 0,67    | 0,81    | 0,38    | 1,07    |
|  | <b>Aire</b>              | 60,2    | 20,8    | 8,1     | 4,8     | 5,1     |

**Tableau 6.30 – Paramètres de décomposition pour une obstruction partielle des lames**

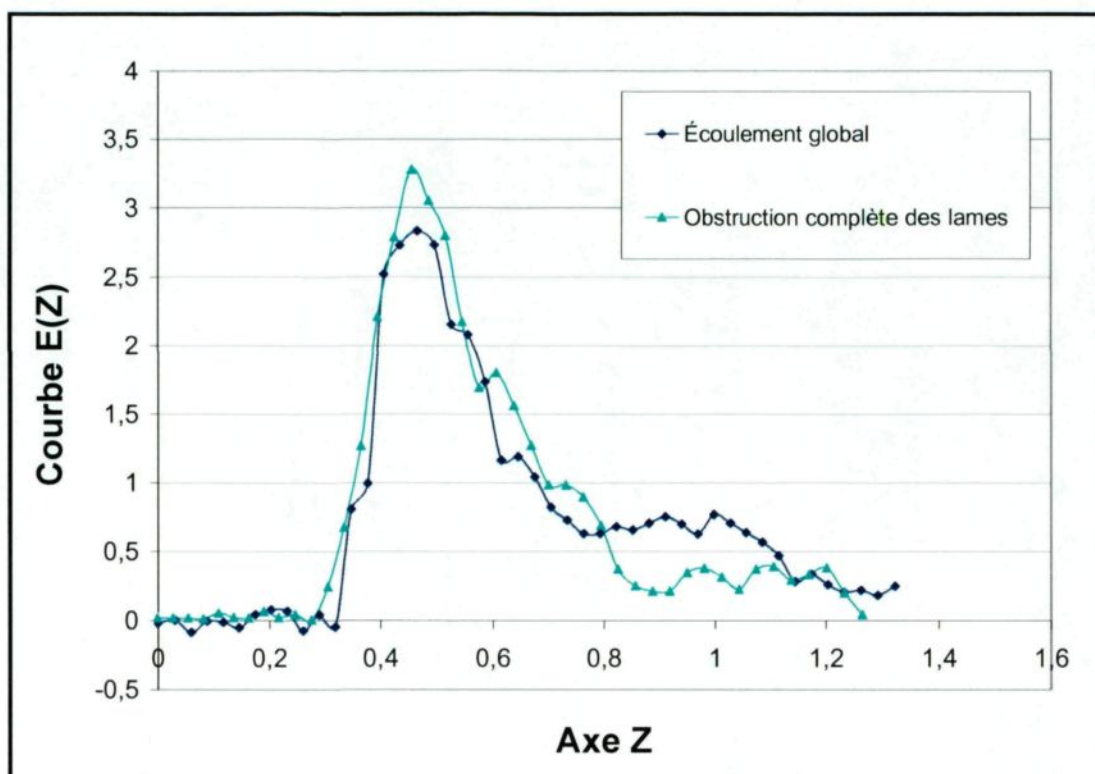
#### **6.4.10.3.3 Obstruction complète des lames « gratte »**

L'obstruction complète des lames est le cas limite d'une obstruction partielle. L'obstruction est réalisée en ajoutant une plaque de métal sur le devant des lames du râteau. La Figure 6.74 présente l'obstruction complète des lames. Les paramètres d'opération sont les mêmes que ceux des essais de calibration. La fraction solide à la sousverse est de 50,4 % p/p mais l'écart-type obtenu est plus grand. La valeur du couple est de 270. L'augmentation de la valeur du couple s'explique par la plus grande masse de boue que déplace le râteau. En effet, il a été observé qu'il se forme un amas de boue devant le râteau. L'amas observé est plus important à l'extrémité de la lame que près de la sousverse. Cet amas agit comme un volume mort dans l'écoulement.



**Figure 6.74 – Obstruction complète des lames**

La Figure 6.75 présente la courbe  $E(Z)$  obtenue pour un écoulement de boue avec une obstruction complète des lames. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont de 0,60 pour l'obstruction complète et 0,66 pour l'écoulement sans restriction confirmant ainsi la présence d'un volume mort dans l'écoulement. L'ajout de l'obstruction devrait modifier de façon importante l'écoulement de la boue dans le décanteur puisque l'action du râteau n'est plus la même.



**Figure 6.75 – Courbe RTD pour une obstruction complète des lames**

Les paramètres de décomposition des courbes sont présentés au Tableau 6.31. On observe que le nombre de pics obtenu de la courbe d'obstruction complète est supérieur à celui généralement obtenu pour les essais de calibration. Les pics 1, 2, 3 et 4 des deux décompositions représentent les mêmes zones d'écoulement mais on constate que la quantité de matériel qui circule à l'intérieur du premier pic (zone centrale) est beaucoup plus importante pour la décomposition obstruée (Aire de 67,5% versus 40,4 %). Ainsi, la zone centrale est beaucoup plus active et elle occupe probablement une portion plus importante du volume de boue.



L'apparition de deux pics supplémentaires est un indice que l'action du râteau est modifiée. En fait, l'obstruction des lames du râteau empêche le déplacement radial. Conséquemment, lorsqu'un volume de boue rencontre la « gratte », celui-ci est complètement déplacé au-dessus de l'obstruction et une petite portion seulement de l'écoulement est déviée vers le centre dû à l'inclinaison du cône. La portion non-déviée retombe derrière la « gratte » approximativement au même endroit. Il est donc normal que le déplacement de la boue s'effectue plus sous forme d'écoulement piston que CSTR, même dans les régions en périphérie du décanteur ( $N = 4$  plutôt que 3). En effet, les pics en provenance de ces zones sont normalement plus aplatis en fonction de la distance parcourue à l'aide du râteau. Il est également possible que l'accumulation de boue sur le devant de la gratte agit comme une seule et grande lame aidant quelque peu au déplacement et au mélange de la boue. Les quantités de matériel transitant par les pics 3 à 7 de la décomposition avec obstruction sont très inférieures indiquant ainsi que ces zones sont beaucoup moins actives. En somme, l'obstruction complète des lames diminue l'efficacité du râteau ce qui se traduit par une modification importante de l'écoulement en provenance des zones près des parois du décanteur.

|                                |                    | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 | Pic # 6 | Pic # 7 |
|--------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Écoulement global              | N                  | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       | --      | --      |
|                                | Z <sub>moyen</sub> | 0,47    | 0,60    | 0,83    | 0,35    | 1,11    | --      | --      |
|                                | Aire               | 40,4    | 24,0    | 14,7    | 3,6     | 15,2    | --      | --      |
| Obstruction complète des lames | N                  | 6       | 4       | 4       | 8       | 4       | 4       | 4       |
|                                | Z <sub>moyen</sub> | 0,50    | 0,69    | 0,79    | 0,33    | 1,01    | 1,11    | 1,21    |
|                                | Aire               | 67,5    | 12,5    | 5,1     | 1,9     | 5,9     | 2,1     | 1,6     |

Tableau 6.31 – Paramètres de décomposition pour une obstruction complète des lames

#### 6.4.10.3.4 Obstruction complète des lames et de la structure

L'étape suivante consiste à observer l'effet de l'obstruction des lames et de la structure (bras) sur la RTD. Pour se faire, une plaque de métal est ajoutée pour couvrir les structures. La Figure 6.76 présente les modifications effectuées pour simuler l'obstruction.



Figure 6.76 – Obstruction complète des lames et de la structure

L'écoulement devrait être similaire à celui observé pour une obstruction complète des lames, mais avec un possible retard de la zone centrale. En effet, s'il se forme un amas de boue sur la plaque recouvrant les structures, cela entraînera un retard dans l'écoulement de la zone centrale (l'écoulement du fer est retardé ou dévié). La Figure 6.77 présente les résultats obtenus pour l'essai de traçage avec obstruction complète des lames et de la structure. Les paramètres d'opération sont les mêmes que ceux des essais de calibration. La fraction solide à la sousverse est de 53,0 % p/p et le couple est de 300. Ces valeurs sont plus élevées, dues à la présence d'amas de boue sur le râteau. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est de 0,59 pour l'obstruction et de 0,66 pour l'écoulement global. La diminution de  $Z_{\text{moyen}}$  confirme la présence d'un volume mort.

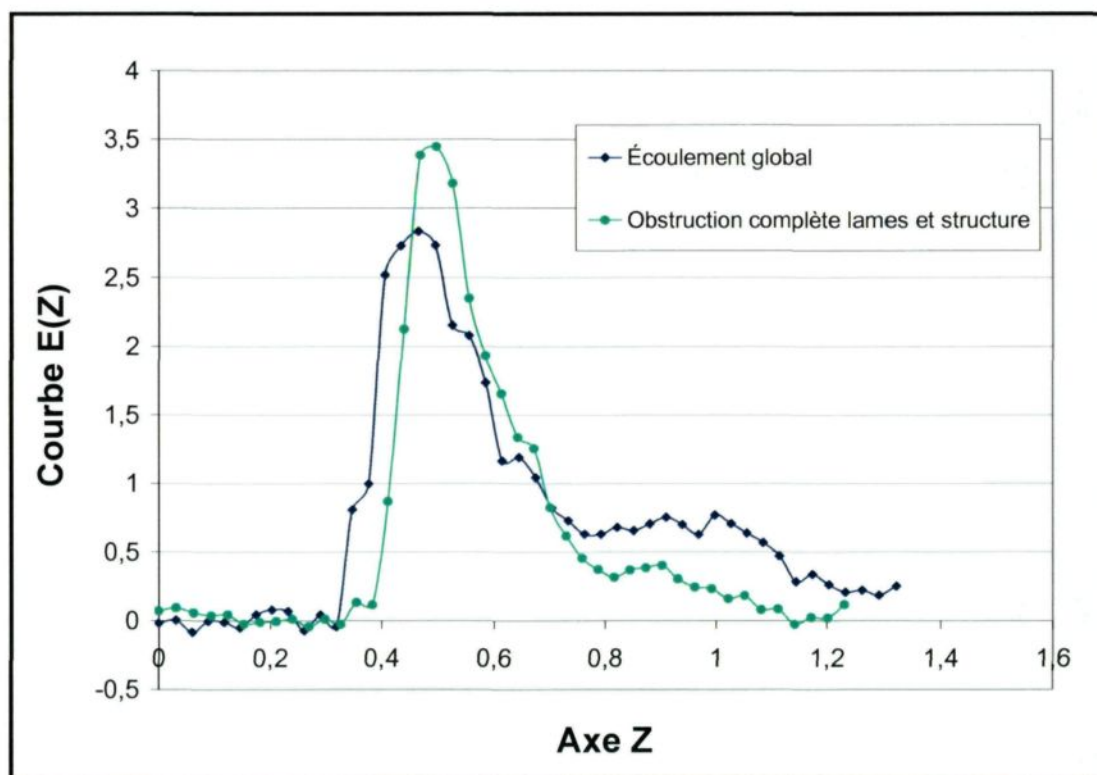


Figure 6.77 – Courbe  $E(Z)$  d'une obstruction complète des lames et de la structure

Les paramètres de décomposition sont présentés au Tableau 6.32. Un délai est observé entre les courbes confirmant ainsi la présence d'un amas de boue plus concentré au centre du décanteur (augmentation de la fraction solide). La décomposition du pic 1 est similaire à celle précédemment obtenue pour une obstruction complète des lames mais est légèrement décalée. La décomposition des pics 2, 3, 4, 5 et 6 est similaire à celles précédemment obtenues pour la « gratte. » En fait, l'augmentation du pourcentage solide de la boue est localisée dans le centre et le reste du décanteur agit plus ou moins de la même façon. On observe cependant que la quantité de matériel circulant dans le pic 2 est plus importante que pour la « gratte » (16,8 % p/p versus 12,5 % p/p). Il est normal d'observer ce phénomène pour conserver l'équilibre dans le lit de boue (le temps plus long pour faire sortir la boue au centre est compensé par une augmentation de la quantité de matériel transitant dans la zone à 0,5 r). L'aire des pics 3, 5 et 6 est cependant moins élevée et le pic 7 n'est pas présent indiquant ainsi que les zones près des parois sont moins actives.

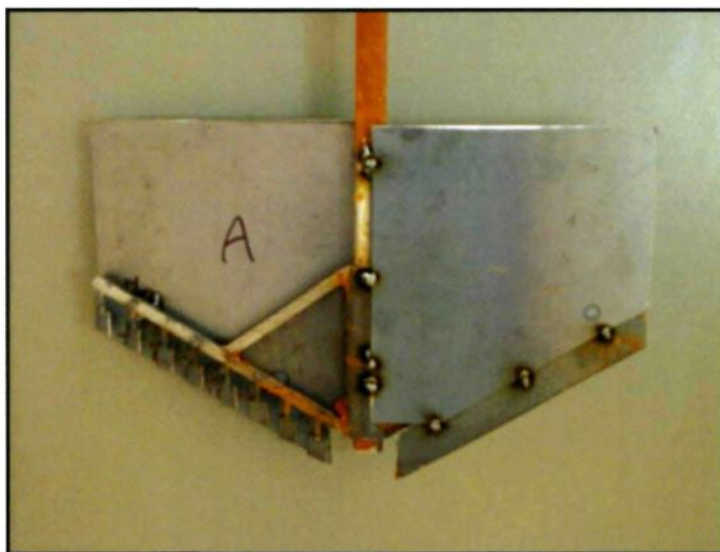
|  |                          | Pic # 1 | Pic # 2 | Pic # 3 | Pic # 4 | Pic # 5 | Pic # 6 | Pic # 7 |
|--|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Écoulement global</b>                           | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 3       | 18      | 3       | --      | --      |
|  | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,47    | 0,60    | 0,83    | 0,35    | 1,11    | --      | --      |
|  | <b>Aire</b>              | 40,4    | 24,0    | 14,7    | 3,6     | 15,2    | --      | --      |
| <b>Obstruction complète des lames et structure</b> | <b>N</b>                 | 6       | 4       | 4       | 8       | 4       | 4       | --      |
|  | <b>Z<sub>moyen</sub></b> | 0,52    | 0,67    | 0,80    | 0,37    | 0,92    | 1,05    | --      |
|  | <b>Aire</b>              | 67,5    | 16,8    | 3,2     | 1,0     | 5,1     | 1,5     | --      |

**Tableau 6.32 – Paramètres de décomposition de l'obstruction complète des lames et de la structure**



#### 6.4.10.3.5 *Obstruction complète du lit de boue*

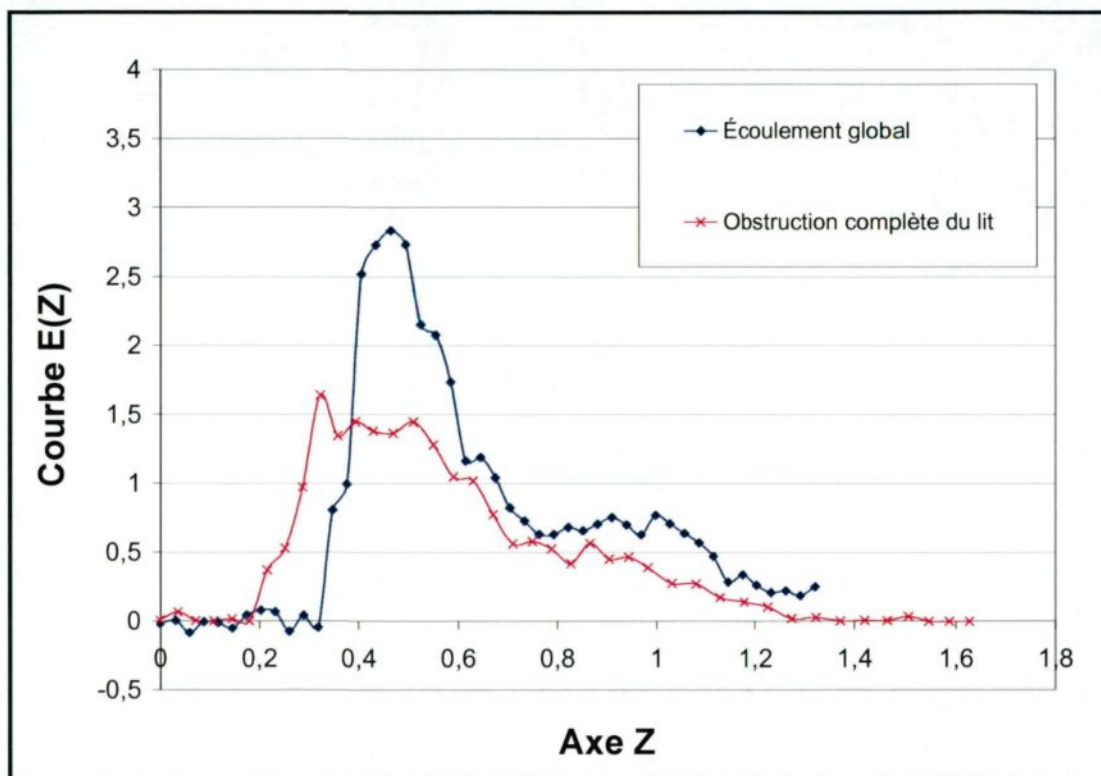
L'obstruction complète du lit de boue représente le cas extrême qui normalement n'arrive pas dans les décanteurs industriels. Pour simuler l'obstruction, une plaque de métal de la même hauteur que le lit de boue a été ajoutée sur l'arbre de rotation du râteau. La Figure 6.78 présente la simulation de l'obstruction complète. Les paramètres d'opération sont les mêmes que ceux des essais de calibration. La quantité de fer retrouvée après l'expérimentation est de 75,7 %. La fraction solide de la sousverse est de 44,4 % p/p. La mesure du couple de 250. Le débit à la sousverse est de 450 mL/min. Plusieurs des mesures expérimentales de contrôle ne sont pas dans les limites habituelles. L'obstruction complète du lit de boue favorise la création d'une nouvelle dynamique d'écoulement.



**Figure 6.78 – Obstruction complète du lit de boue**

La Figure 6.79 présente la courbe expérimentale obtenue. La valeur de  $Z_{\text{moyen}}$  est de 0,58 et la valeur de  $\tau$  de 64,0 min. On observe que les courbes obtenues sont très

différentes. Bien évidemment, la décomposition de la courbe est elle aussi différente. En effet, l'écoulement est réparti en 7 pics principaux plus un écoulement PFR différent. L'écoulement de la boue dans un même décanteur peut donc être différent en fonction des conditions expérimentales. Dans la présente situation, la diminution de la fraction solide à l'intérieur du lit semble faciliter le déplacement gravitationnel de la boue.



**Figure 6.79 – Courbe  $E(Z)$  d'une obstruction complète du lit de boue**

## CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet de recherche consistait à développer une méthode de mesure efficace, pouvant être utilisée dans les décanteurs industriels, permettant d'identifier les comportements caractéristiques du déplacement des boues rouges afin d'optimiser l'étape de séparation solide/liquide.

Une méthodologie expérimentale de traçage ferromagnétique a été développée afin d'effectuer des essais de traçage dans des décanteurs de boue rouge. Ainsi, en utilisant un traceur de poudre de fer, il est possible de simuler le comportement et le déplacement des boues rouges. Le traceur est détecté par des variations de la densité du flux magnétique entourant une bobine d'induction. En mesurant la fréquence de résonance d'un circuit LC, la masse de particules de fer présente dans la bobine est mesurée. La limite de détection de l'appareil de mesure pour des essais de traçage en continu est de 0,10 g de fer par litre de boue avec un écart-type de 13 %. Cette limite est 5 fois moins grande que celle obtenue avec la première version de l'appareil de mesure (mesure de tension d'un circuit RL). Les courbes de calibrations de l'appareil de mesure dépendent cependant du type de boue, de la concentration solide de la boue et du volume de boue présent dans la bobine de mesure. De plus, avant d'effectuer un essai de traçage, une ligne de base initiale de la boue doit être enregistrée afin de déterminer les concentrations d'oxyde de fer initialement présentes dans la boue. D'autre part, l'appareil de mesure est sensible aux vibrations et par conséquent le tuyau traversant l'appareil de mesure doit être solidement fixé pour la durée de

l'expérimentation. En somme, le premier objectif qui consistait à perfectionner la méthode de mesure par traçage ferromagnétique pour la rendre efficace, reproductible et facilement utilisable dans les conditions d'opération du procédé Bayer a été atteint. L'appareil de mesure actuel est encore à l'état de prototype. Des améliorations peuvent être apportées pour en faciliter l'utilisation dans les décanteurs industriels : améliorer la robustesse, diminuer sa fréquence d'échantillonnage ou augmenter la taille des bobines, minimiser sa taille, etc.

Un décanteur expérimental a également été construit pour effectuer des essais de séparation solide/liquide en continu sous diverses conditions d'opération. La reproductibilité des essais de traçage a été validée en reproduisant trois fois un test de référence. Plusieurs paramètres expérimentaux de contrôle permettent de s'assurer de la stabilité du processus de séparation solide/liquide : la concentration solide de l'alimentation, la vitesse de sédimentation, les débits d'entrée (liqueur Bayer, suspension de boue rouge, flocculant) et de sortie (sousverse), la fraction solide à la sousverse, le niveau de boue et la mesure du couple. L'écart-type associé à chacun de ces paramètres pour les essais de reproductibilité est très faible (environ 4 % d'erreur moyenne pour toutes les mesures) et par conséquent le processus de séparation solide/liquide est bien maîtrisé. Les courbes expérimentales de traçage obtenues pour ces essais sont elles aussi reproductibles. Par conséquent, il est possible d'effectuer des variations sur le processus et d'en observer l'impact sur la courbe de RTD.



Les courbes expérimentales doivent être manipulées mathématiquement avant d'obtenir la courbe de RTD. En effet, toutes les courbes subissent un traitement préliminaire afin de pouvoir faciliter leur comparaison. Ainsi, les courbes sont recalées, lissées, recentrées puis converties en concentration de fer. Les courbes  $E(t)$  et  $E(\theta)$  sont obtenues par des mesures expérimentales selon le traitement mathématique présenté au Chapitre 4. Cette approche est cependant valide seulement pour des systèmes à l'état d'équilibre. Malheureusement, le processus de séparation solide/liquide n'est jamais parfaitement constant et des variations se produisent surtout au niveau du débit de sousverse et de la concentration solide de celle-ci. Afin de tenir compte de ces variations, l'axe de temps standard est remplacé par un axe  $Z$  qui représente le rapport entre la quantité de matériel solide évacuée jusqu'au temps  $t$  et la quantité de matériel présent dans le décanteur. Il est possible d'utiliser ce nouvel axe  $Z$  puisque les variations de débit sont faibles et n'influencent pas le type d'écoulement dans le décanteur. Les nouvelles courbes RTD ou  $E(Z)$  obtenues sont similaires aux courbes usuelles et elles sont reliées à la probabilité par unité de temps pour qu'une particule sorte du décanteur lorsqu'une quantité de matériel «  $Z$  » a été évacuée à la sousverse du décanteur.

L'analyse des courbes RTD permet d'obtenir des informations sur les conditions d'écoulement à l'intérieur du décanteur. Les informations de bases obtenues sont le temps de résidence moyen et la forme ou type de l'écoulement global (PFR ou CSTR). Généralement, les RTD observés ne sont pas parfaitement associés aux écoulements idéaux, mais présentent plutôt une combinaison variée de ces écoulements. Autrement dit,

la RTD représente la somme des écoulements existants à l'intérieur du décanteur. Pour obtenir les écoulements individuels, une méthode d'analyse doit être utilisée. Ainsi, une méthode d'analyse des courbes RTD, basée sur un principe de décomposition en pics, a été développée. Le modèle mathématique utilisé pour chacun des pics de décomposition est celui du réservoir en série. Ce modèle est simple d'utilisation et il permet d'obtenir des courbes de décomposition similaires à celles obtenues expérimentalement. La décomposition s'effectue selon l'importance des pics. L'écoulement associé à ces pics est soustrait tour à tour de l'écoulement global jusqu'à ce que les pics présents dans la courbe d'écoulement global ne puissent plus être différenciés du bruit expérimental.

La méthode de décomposition en pics a permis de cibler 5 types d'écoulement à l'intérieur du décanteur. De plus, une autre zone d'écoulement peut être associée à la portion de la RTD située entre l'origine et le début de la courbe. Cette dernière est associée à une zone d'écoulement PFR existant dans la portion cylindrique du décanteur. En effet, il n'y a aucune aide mécanique au déplacement de la boue dans cette portion du décanteur et le transport de la boue s'effectue donc dans une seule direction. La décomposition en 5 pics est donc associée à l'écoulement de la boue dans la zone conique du décanteur induite sous l'action du râteau, et est associée à trois zones principales : une zone active rapide (pic 1 et 4) située dans la partie centrale à  $r = 0$ , une zone intermédiaire (pic 2) située à  $0,5 r$  et une zone lente (pic 3 et 5) près des parois à  $r = r$ . Le râteau agit comme aide au transport de la boue mais également comme mélangeur. Ainsi, les pics en provenance des régions périphériques sont plus aplatis et déformés (similaire à un CSTR) que ceux au centre du

décanteur (similaire à un PFR). On observe également que plus de la moitié de la boue introduite dans le décanteur est traitée par la zone rapide et que les zones en périphéries du décanteur sont beaucoup plus lentes.

Des injections localisées de traceur de fer ont été effectuées afin d'étudier le comportement d'écoulement de la boue dans les zones spécifiques. En déposant le fer à la surface du lit, il est possible d'observer la trace associée pour les trois principales zones d'écoulement ( $r = 0$ ,  $0,5 r$  et  $r$ ). Les résultats obtenus démontrent que les décompositions en pics de l'écoulement global correspondent approximativement aux injections localisées de chacune des zones correspondante en utilisant une valeur de décalage. En effet, le délai initial des courbes d'injections localisées est moins important que celui observé sur l'écoulement global. Lors d'injections localisées, la poudre de fer est mélangée à de la boue de sousverse et lorsque celle-ci est déposée à la surface du lit, elle s'enfonce rapidement pour rejoindre une boue de densité similaire court-circuitant ainsi l'écoulement PFR. Bref, la méthode d'analyse des résultats permet d'obtenir des informations sur chacune des zones existantes dans le décanteur.

Des injections circulaires ont été réalisées afin d'évaluer si les écoulements observés dans une position donnée sont les mêmes sur toute la surface du décanteur. Les valeurs de  $Z_{\text{moyen}}$  sont du même ordre de grandeur que celles obtenues pour les injections localisées. Les courbes obtenues ne sont cependant pas parfaitement symétriques confirmant ainsi que certaines zones agissent différemment. Conséquemment, l'objectif de

développer une méthode d'analyse des courbes RTD afin d'identifier les comportements caractéristiques du déplacement des boues rouges dans un décanteur a été atteint.

Plusieurs autres essais ont été effectués afin d'observer leurs effets sur la RTD. Ainsi, il a été démontré que l'emplacement de l'alimentation avait une incidence sur la répartition des agrégats et sur la structure du lit de boue. Le type de puits d'alimentation utilisé a également une incidence sur la RTD. Les variations observées dans ces essais sont principalement dues à l'accumulation de boue dans certaines sections du décanteur. Étant donné la taille du décanteur, ces paramètres influencent beaucoup les RTD obtenues. Il est cependant plausible de penser que ces variations ne seraient pas aussi marquées dans un décanteur à grande échelle.

En évaluant l'impact de la vitesse de rotation du râteau sur la RTD, il a été démontré que le moment d'apparition des pics de décomposition est relié à la vitesse de rotation. Cette observation a été faite pour une vitesse de rotation moitié moins grande. Dans la situation opposée (vitesse doublement plus grande), la vitesse était trop importante et les conditions d'écoulement dans le cône ont complètement changé se rapprochant plus d'un écoulement CSTR.

La hauteur du lit de boue a également une incidence sur la RTD. Plus le niveau est élevé, plus le temps de résidence est long. Cependant, la portion de volume mort à l'intérieur du décanteur augmente également. Le dosage de flocculant influence également la

structure du lit et la forme de la RTD, mais de façon moins prononcée. L'augmentation du dosage favorise l'augmentation de la concentration solide jusqu'à une certaine limite où la quantité supplémentaire ajoutée semble augmenter le pourcentage de zone morte.

Des problématiques courantes ont également été simulées à l'aide du décanteur expérimental pour en observer les signatures RTD. Des essais ont été effectués pour détecter le passage du râteau. Malheureusement, le passage du râteau n'a pas été détecté dans un décanteur expérimental de petite taille. Il a été précédemment démontré, au cours d'un essai industriel, que des pics périodiques correspondant à la fréquence de rotation des râteaux apparaissent sur la courbe de RTD. Or, l'espacement des lames du râteau doit être supérieur à une valeur seuil pour que la modulation produite par le râteau soit visible. Il serait judicieux d'effectuer des essais supplémentaires dans des décanteurs industriels afin de valider la présence de ces pics et leur association à la vitesse de rotation des râteaux.

Un des problèmes couramment rencontré est l'apparition de court-circuit ou « rat hole » sur les pourtours du puits de sousverse. Les courbes de RTD obtenues démontrent qu'il est facile de détecter l'apparition d'un court-circuit dans l'écoulement. En effet, la signature associée à cette problématique est très facilement distinguable (pic d'amplitude très élevée apparaissant presque immédiatement après l'injection). La présence de volume mort peut également être observée à l'aide de la RTD, mais la comparaison avec une trace obtenue dans des conditions normales est souhaitable. De façon analogue, l'obstruction des râteaux a également une incidence sur la trace. Par exemple, une obstruction partielle

s'observe par une diminution de l'activité des zones en périphérie du décanteur (zone à  $r = r$ ) et une augmentation du couple. En effet, l'efficacité de transport du râteau est diminuée et la boue en périphérie devient de moins en moins active. Dans le cas d'une obstruction complète, l'écoulement de la boue est très différent. En effet, le déplacement de la boue s'effectue toujours mais sans l'action radiale du râteau. Le cas de l'obstruction complète du lit de boue présente une courbe d'écoulement complètement différente. En somme, les essais effectués ont permis de démontrer qu'il est possible de détecter certains problèmes grâce à la RTD. Néanmoins, plusieurs de ces problèmes ne peuvent être détectés que lorsqu'il est possible de comparer les courbes d'écoulement dans les conditions normales. La façon la plus judicieuse d'utiliser l'appareil de mesure et la technique de traçage consisterait à effectuer des essais à intervalles réguliers tout au long de la durée de vie d'un décanteur et d'en observer les variations avec le temps, du moins pour établir les courbes de RTD correspondant au vieillissement du décanteur.

En somme, les principaux objectifs ont été réalisés. La méthode de traçage actuelle n'a cependant pas encore été validée dans les décanteurs industriels. D'autres essais exploratoires devraient également être effectués afin d'étudier plus spécifiquement les impacts du râteau sur l'écoulement, comme en utilisant une configuration de lame différente par exemple. Les résultats obtenus démontrent que les analyses de la RTD avec la méthode de décomposition en pics permettent d'évaluer l'état du décanteur et de diagnostiquer certains problèmes. De plus, elles permettent également d'évaluer les effets de certains paramètres sur le transport des boues tels que l'efficacité des râteaux, la

présence de chemins préférentiels, etc. Bref, cet outil de travail semble idéal pour aider à la compréhension des écoulements de la boue rouge dans les décanteurs industriels en plus de permettre le diagnostic de problèmes opérationnels.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Leclerc, A., Boivin, A., Simard, G., Morin, L., Gagnon, M.J., Verreault, R. et Peloquin, G. ; Electromagnetic detection of iron tracers for monitoring particles displacement in gravity settlers, Proceedings of the 7th International Alumina Quality Workshop, 16-21 October 2005, Perth, Western Australia, p. 127-130.
2. Kato, M., Hirayama, T., Nishimura, K., Tomohiro, I., Watanabe, H. et Tsurumaki, K.; Application of radioisotopes in the aluminum industry in Japan, IAEA-SM-159/9, Japan, p. 37-48.
3. Boivin, A., Morin, L., Leclerc, A., Simard, G., Gagnon, M.J. et Verreault, R.; Détection électromagnétique d'un traceur de poudre de fer dans la boue rouge, Rapport GRUSSL 04-07, Université du Québec à Chicoutimi, 2004, 30 pages.
4. Martin, A.D.; Interpretation of residence time distribution data, Chemical Engineering Science, Vol. 55, Mars 2000, p. 5907-5917.
5. Bouchard, M.L. et Richard, S.A.; Détermination du temps de résidence moyen d'un décanteur de boue rouge avec un traceur ferromagnétique, Rapport de projet, Université du Québec à Chicoutimi, GRUSSL/CURAL, 105 pages.



6. Leclerc, J.P., Detrez, C., Bernard, A. et Schweich, D.; DTS: Un logiciel d'aide à l'élaboration de modèles d'écoulement dans les réacteurs, Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol. 50, No. 5, septembre-octobre 1995, p. 641-656.
7. Roche, N., Bendounan, R. et Prost, C.; Modélisation de l'hydrodynamique d'un décanteur primaire de station d'épuration, Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 7, 1994, p. 153-167.
8. Robson, B.J.; Product silica control options Kwinana refinery, Light Metals, 1988, p. 87-94.
9. Lindeborg, C., Wiberg, N. et Seyf, A.; Studies of the dynamic behaviour of a primary sedimentation tank, Water Sciences and Technology, vol. 34, No. 3-4, 1996, p. 213-222.
10. Grocott, S.C. et McGuiness, L.; Residence-time distributions in Bayer process vessels development of a suitable liquor tracer, Light Metals, 1990, p. 95-102.
11. Harrison, E.H., Lépine, L., Gaboury, A. et Thé, K.; The use of sodium nitrate as a tracer in Bayer liquor: analysis by ion-chromatography, Light Metals, 1987, p. 73-76.
12. Schooler, L.N. et Ruiz, G.; Residence time distribution studies in predigestion desilication, Light Metals, 1985, p. 117-123.

13. Evans, G.V.; The use of tracers in water pollution control, Physics in Technology, Vol. 13, 1982, p. 3-10.
14. Bujdosó, E. et Toth, L.; Silver Jubilee of the application of nuclear methods in the hungarian aluminium industry, Journal of Radioanalytical Chemistry, Vol. 68, No. 1-2, 1982, p. 39-58.
15. Kim, H.S., Shin, M.S., Jang, D.S. Jung, S.H. et Jin, J.H.; Study of flow characteristics in a secondary clarifier by numerical simulation and radioisotope tracer technique, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 63, 2005, p. 519-526.
16. Solymar, K. et Bujdosó, E.; Properties of red mud in the Bayer process and its utilization, p. 717-744.
17. Grayman, W.M., Deininger, R.A., Green, A., Boulos, P.F., Bowcock, R.W. et Godwin, C.C.; Water quality and mixing models for tanks and reservoirs, Journal of American Water Works Association, 1996, p. 60-73.
18. American Water Works Association research foundation; Tracer studies in water treatment facilities: a protocol and case studies, 1996, Chapitre 6, p. 97-112.
19. Iasenza, R.; Mixing and transport processes in wastewater basins, Thèse, Université McGill, 1998, 123 pages.

20. Imam, E., McCorquodale, J.A., ASCE, A.M. et Bewtra, J.K.; Numerical modeling of sedimentation tanks, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109, No. 12, 1983, p. 1740-1754.
21. Matko, T., Fawcett, N., Sharp, A. et Stephenson, T.; A numerical model of flow in circular sedimentation tanks, Institution of Chemical Engineers, Vol. 74, Part B, 1996, p. 197-204.
22. Danckwerts, P.V.; Continuous flow systems distribution of residence time, Chemical Engineering Science, Vol. 2, 1953, No. 1, p. 1-13.
23. Leclerc, J.P., Claudel, S., Lintz, H.G., Potier, O. et Antoine, B.; Theoretical interpretation of residence time distribution measurements in industrial processes, Oil & Gas Science and Technology, Vol. 55, No. 2, 2000, p. 159-169.
24. Levenspiel, Octave; Chemical reaction engineering, Third Edition, John Wiley & Sons, 1999, 668 pages.
25. Fogler, H. Scott; Elements of chemical reaction engineering, Fourth Edition, Prentice Hall PTR, 2006, 1080 pages.
26. Lopes, J.M., Lemos, F., Pinheiro, C., Ramôa Ribeiro, F., Magalhaes, F.D., Mendes, A. et Costa, C. ; Teaching residence time distribution in the laboratory, International Journal of Engineering, Vol. 18, No. 6, 2002, p. 674-681.

27. Cristol, B., Perret, Y. et Santos-Cottin, H.; Hydrodynamics effect on precipitation yield, Light Metals, 1991, p. 81-89.
28. Bouchard, M.L.; Étude sur la clarté d'une suspension de boues rouges et de liqueur Bayer à l'aide d'un appareil de Couette, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, GRUSSL/CURAL, 2006, 251 pages.
29. Larouche, Daniel; Ingénierie de l'Aluminium, Département d'Ingénierie 6GEN654 Université du Québec à Chicoutimi, 2002, Chapitre II, p. 9-18.
30. Site Internet ; <http://fr.wikipedia.org/wiki/Bauxite>
31. Ostap, Steve; Chemistry of low temperature digestion in the Bayer process, Accession number CRDA106809, 2000, 28 pages.
32. Chimie de la digestion à basse température du procédé Bayer, Manuel du participant, révision 1, Alcan International Limitée, Juin 2001.
33. Introduction au Procédé Bayer, Alcan, p. 42-172.
34. Liu, Y., Lin, C. et Wu, Y.; Characterization of red mud derived from a combined Bayer process and bauxite calcination method, Journal of Hazardous Materials, Vol. 146, Issues 1-2, 2007, p. 255-261.
35. Solymar, K.; Recent results in the chemistry and modelling of the Bayer process, Proceeding of the Second International Symposium of ICSOBA, Vol. 3, 1971, p. 45-65.

36. Eremin, N.I.; *Investigations on the complex processing of bauxites*, Proceeding of the Second International Symposium of ICSOBA, Vol. 3, 1971, p. 329-335.
37. Svarosky, L.; *Solid-Liquid Separation*, Fourth Edition, Butterworth Heinemann, 2000, 554 pages.
38. Rushton, A., Ward, A.S. et Holdich, R.G.; *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology*, 2<sup>e</sup> édition, Wiley-VCH, 2000, p. 1-587.
39. Schweitzer, P. A.; *Handbook of separation techniques for chemical engineers*, Third Edition, McGraw-Hill, 1996, p. 4-130 à 4-159.
40. Jorgensen, S. E.; *Industrial waste water management*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1979, 388 pages.
41. Tchobanoglous, G. et Burton, F. L.; *Wastewater engineering treatment, disposal and reuse*, Third Edition, McGraw-Hill, 1991, p. 220-240.
42. Sundstrom, D. W. et Klei, H. E.; *Wastewater treatment*, Prentice-Hall, 1979, p. 187-208.
43. Kynch, G.J.; *A theory of sedimentation*, Transactions of the Faraday Society, Vol. 48, 1952, p. 166-176.
44. Coe, H.S. et Clevenger, G.H.; *Methods for determining the capacities of slime-settling tanks*, AIME, Vol. 55, 1917, p. 356-384.

45. Talmage, W.P. et Fitch, E.B.; Determining thickener unit areas, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 47, 1955, p. 38-48.
46. Momento technique de l'eau, 9<sup>ième</sup> édition, Tome 1, Copyright par Degremont, Paris, p. 1-271.
47. Edeline, F.; L'épuration physico-chimique des eaux, 2<sup>ième</sup> édition, Cebedoc Éditeur, Paris, 1992, 283 pages.
48. Poirier, M.R.; Evaluation of flocculation and filtration procedures applied to WSRC sludge: A report from B. Yarar, Colorado School of Mines, 16 avril 2001.
49. Schroeder, E. D.; Water and wastewater treatment, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1977, p. 135-160.
50. Gagnon, M.J., Leclerc, A., Simard, G. et Péloquin, G.; A fractal model for the aggregate size distributions generated during red mud flocculation, Light Metals, 2003, p. 105-111.
51. Kirwan, L. J., Fawell, P. D. et Bronswijk, W. V.; An in situ FTIR-ATR study of polyacrylate adsorbed onto hematite at high pH and high ionic strength, Langmuir 2004, vol. 20, p. 4093-4100.
52. Fawell, P. D., Kirwan, L. J. et Bronswijk, W. V.; Adsorption of polyacrylates on hematite: in situ examination by FTIR-ATR at high and low pH, Proceedings of the 6

- th International Alumina Quality Workshop, Brisbane, Australie, 8-13 septembre 2002, 8 pages.
53. Jewell, R.J. et Fourie, A.B.; *Paste and thickened tailings – A guide*, Second edition, ACG, CSIRO, 2006, 257 pages.
  54. Peloquin, G.; *Modélisation mathématique de la décantation de la boue rouge*, Thèse, Université du Québec à Chicoutimi, 2003, 258 pages.
  55. Connelly, L.J., Owen, D.O. et Richardson, P.F.; *Synthetic flocculant technology in the Bayer process*, Lights Metals, 1986, p. 61-68.
  56. Wilhelm, I.H. et Naide, Y.; *Sizing and operation of continuous thickeners*, Mining Engineering, Vol. 33, 1981, p.1710-1718.
  57. Boivin, A.; *Étude expérimentale sur le compactage de la boue rouge dans un décanteur semi-industriel*, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 2004, 214 pages.
  58. Site internet ; <http://www.solidliquid-separation.com>
  59. Sutalo, I.D., Paterson, D.A. et Rudman, M.; *Flow visualization and computational prediction in thickener rake models*, Minerals Engineering, Pergamon, Vol. 16, 2003, p. 93-102.
  60. Albertson, O. E. et Okey, R. W.; *Evaluating scraper designs*, Water Environment and Technology, January 1992, p. 52-58.

61. Gunthert, F.W.; Thickening zone and sludge removal in circular final settling tanks, Water Science and Technology, Vol. 16, 1984, p. 303-316.
62. Warden, R.H.; The design of rakes for continuous thickeners especially for waterworks coagulant sludges, Filtration and Separation, March/April 1981, p. 113-116.
63. Frost, R.C., Halliday, J. et Dee, A.S.; Continuous consolidation of sludge in large scale gravity thickeners, Water Science and Technology, Vol. 28, No. 1, 1993, p. 77-86.
64. Simard, G., Leclerc, A., Gagnon, M.J., Boivin, A. et Peloquin, G.; Modèle mathématique semi-empirique du compactage de la boue rouge par l'action du râtelier, Rapport de recherche, Alcan International Limitée, Avril 2005, 41 pages.
65. Schramm, G.; A practical approach to rheology and rheometry, HAAKE, 1994, 300 pages.
66. Couarraze G. et Grossiord J.L.; Initiation à la rhéologie, Lavoisier-Tec & Doc, deuxième édition, 1991, 272 pages.
67. Levenspiel, O. et Bischoff, K.; Patterns of flow in chemical process vessels, In Advances in Chemical Engineering, Vol. 4, 1963, p. 95-199.
68. Levenspiel, O.; Longitudinal mixing of fluids flowing in circular pipes, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 50, No. 3, 1958, p. 343-346.



69. Levenspiel, O. et Smith, W.K.; Notes on the diffusion-type model for the longitudinal mixing of fluids in flow, Chemical Engineering Sciences, Vol. 6, 1957, p. 227-233.
70. Levenspiel, O. et Smith, W.K.; Commentary from current contents, Chemical Engineering Sciences, No. 44, 1979, p. 3889.
71. International Atomic Energy Agency (IAEA), Radiotracer applications in industry – a guidebook, Technical Reports Series no. 423, 2004, 281 pages.
72. International Atomic Energy Agency (IAEA); Guidebook on radioisotope tracers in industry, Technical Reports Series No. 316, 1990, 370 pages.
73. Furman, L., Leclerc, J. P. et Stegowski, Z.; Tracer investigation of a packed column under variable flow, Chemical Engineering Science, Vol. 60, 2005, p. 3043-3048.
74. Rash, J. K. et Liehr, S. K.; Flow pattern analysis of constructed wetlands treating landfill leachate, Water Science and Technology, Vol. 40, No. 3, 1999, p. 309-315.
75. Niemi, A. J.; Residence time distributions of variable flow processes, International Journal of Applied Radiation and Isotopes, Vol. 28, 1977, p. 855-860.
76. Niemi, A. J.; Tracer responses and control of vessels with variable flow and volume, Isotopenpraxis, Vol. 26, No. 9, 1990, p. 435-438.
77. Ylinen, R. et Niemi, A. J., Letters to the Editors; Some comments on “residence time distribution for unsteady-state systems” by J. Fernandez-Sempere et al., Chemical Engineering Science, Vol. 52, No. 6, 1997, p.1065-1067.

78. Niemi, A.; Tracer testing of particulate matter systems for their dynamics, IAEA-SM-159/5, p. 131-140.
79. Fernandez-Sempere, J., Front-Montesinos, R. et Espejo-Alcaraz, O.; Residence time distribution for unsteady-state systems, Chemical Engineering Science, Vol. 50, No. 2, 1995, p. 223-230.
80. Fernandez-Sempere, J., Front-Montesinos, R. et Espejo-Alcaraz, O.; Authors' reply to the comments of R. Ylinen and A.J. Niemi, Chemical Engineering Science, Vol. 52, No. 6, 1997, p. 1069-1071.
81. Nir, A.; Tracer relations in mixed lakes in non-steady state, Journal of Hydrology, Vol. 19, 1973, p. 33-41.
82. Nauman, E.B., Residence time distribution theory for unsteady stirred tank reactors, Chemical Engineering Science, Vol. 24, 1969, p. 1461-1470.
83. Olivet, D., Valls, J., Àngels, G., Àngels, F. et Sanchez, A.; Application of residence time distribution technique to the study of the hydrodynamic behavior of a full-scale wastewater treatment plant plug-flow bioreactor, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol. 80, 2005, p. 425-432.
84. Mitsutani, K., Grace, J.R. et Lim, C.J.; Residence time distribution of particles in a continuous liquid-solid classifier, Chemical Engineering Science, Vol. 60, 2005, p. 2703-2713.

85. Claudel, S., Fonteix, C., Leclerc, J.P. et Lintz, H.G.; Application of the possibility theory to the compartment modelling of flow pattern in industrial processes, Chemical Engineering Science, Vol. 58, 2003, 4005-4016.
86. Kjellstrand, R., Mattsson, A., Niklasson, C. et Taherzadeh, M.J.; Short circuiting in a denitrifying activated sludge tank, Water Sciences and Technology, Vol. 52, No. 10-11, 2005, p. 79-87.
87. Battaglia, A., Fox, P. et Pohland, F.G.; Calculation of residence time distribution from tracer recycle experiments, Water Research, Vol. 27, No. 2, 1993, p. 337-341.
88. Swaine, D.E. and Daugulis, A.J.; Review of liquid mixing in packed bed biological reactors, Biotechnology Progress, Vol. 4, No. 3, 1988, p. 134-148. (conclusion)
89. Torres, A.P., Oliveira, F.A.R. et Fortuna, S.P.; Residence time distribution of liquids in a continuous tubular thermal processing system part I: relating RTD to processing conditions, Journal of Food Engineering, Vol. 35, 1998, p. 147-163.
90. Venter, B.J., Afewe, K.I. et Lewis, G.O.; Developing a methodology for estimating the performance of a series system of non-ideal CSTRs, The Journal of the South Africa Institute of Mining and Metallurgy, July/August 1999, p. 207-212.
91. Naméche, T. and Vassel, J.L.; New method for studying the hydraulic behaviour of tanks in series-application to aerated lagoons and waste stabilization ponds, Water Sciences and Technology, Vol. 33, No. 8, 1996, p. 105-124.

92. Bamford, C.H., Tipper, C.F.H. et Compton, R.G.; Comprehensive chemical kinetics "kinetics and chemical technology", Vol. 23, Elsevier, 1985, Chapitre 6, p. 223-281.
93. Szalai, L., Krebs, P. et Rodi, W.; Simulation of flow in circular clarifiers with and without swirl, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 120, No. 1, 1994, p. 4-21.
94. Kahane, R.B. et McRae, C.; Improved bauxite residue settler performance at Worsley Alumina, Fourth International Alumina Quality Workshop, Vol. 1, 1996, p. 227-237.
95. Kahane, R., Nguyen, T. and Schwarz, M.P.; CFD modelling of thickeners at Worsley Alumina Pty Ltd, Applied Mathematical Modelling, Vol. 26, 2002, p. 281-296.
96. Kahane, R.B., Schwarz, M.P. et Johnston, R.M.; Residue thickener modelling at Worsley Alumina, Proceeding of the International Conference on CFD in Minerals and Metals Processing and Power generation, CSIRO Minerals, 1997, p. 109-118.
97. Sutalo, I.D., Nguyen, T., white, R.B. et Rudman, M.; Experimental and numerical investigation of the fluid flow in thickener feedwells, Sixth World Congress of Chemical Engineering, Melbourne, 2001, papier No. 941.
98. White, R.B., Sutalo, I.D. et Nguyen, T.; Fluid flow in thickener feedweel models, Minerals Engineering, Vol. 16, Issue 2, 2003, p.145-150.
99. Bouchard, M.L. et Guérard, S.; Analyse de la distribution du temps de résidence dans un décanteur de boue rouge, Rapport de session, Optimisation Avancée, Université du Québec à Chicoutimi, 2007, 28 pages.

100. Deininger, A., Gunther, F.W. and Wilderer, P.A.; *The influence of currents on circular secondary clarifier performance and design*, Water Sciences and Technology, Vol. 34, No. 3-4, 1996, p.405-412.
101. Pant, H.J., Kundu, A. et Nigam, K.D.P.; *Radiotracer applications in chemical process industry*, Reviews in Chemical Engineering, Vol. 17, No. 3, 2001, p. 165-252.
102. Gupta, M., Yang, J., Métral, S. et Roy, C.; *Flow characterization of moving and stirred bed vacuum pyrolysis reactor from RTD studies*, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 82, No. A1, 2004, p. 34-42.
103. Reitz, J.R. et Milford, F.J.; *Foundations of electromagnetic theory*, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1967, 435 pages.
104. Escobar, M.A., Magana, L.F. et Valenzuela, R.; *Effect of the grain size distribution on the magnetization curve*, Journal of Applied Physics, Vol. 57, No. 6, 1985, p. 2142-2146.
105. Ding, J., Tsuzuki, T., McCormick, P.G. et Street, R.; *Structure and magnetic properties of ultrafine Fe powders by mechanochemical processing*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 16, 1996, p. 271-276.
106. Gokturk, H.S., Fiske, T.J. et Kaylan, D.M.; *Electric and magnetic properties of a thermoplastic elastomer incorporated with ferromagnetic powders*, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 29, No. 6, 1993, p. 4170-4176.

107. Gendron, R., Daigneault, L.E., Tatibouët, J. et Dumoulin, M.M.; Residence time distribution in extruders determined by in-line ultrasonic measurements, Advances in Polymer Technology, Vol. 15, No. 2, 1996, p. 111-125.
108. Schule, H., Meder, S. et Muller, C.; Bestimmen des verweilzeitverhaltens in extrudern (determining the residence time behaviour in extruders), Kunststoffe, Vol. 78, No. 1, 1988, p. 78-83.
109. Puaux, J.P. et Ainser, A.; Residence time distribution of a twin-screw extruder, ANTEC: conference proceeding, San Francisco, May 1-5, issue 2, 1994, p. 1500-1502.
110. Bowser, T.; Metal detectors for food processing, FAPC "Food and Agricultural Products Research and Technology Center", p. 105-1-105-4.
111. Kraus, J.D.; Electromagnetics, Fourth Edition, McGraw-Hill, Inc., 1992, 847 pages.
112. Boridy, E.; Électromagnétisme théorie et applications, Presses de l'universit. Du Québec, 1992, 843 pages.
113. Bozorth, R.M.; Ferromagnetism, D. Van Nostrand Company, Inc., 8<sup>ième</sup> Edition, 1964, 968 pages.
114. Chikazumi, S.; Physics of magnetism, John Wiley and Sons, Inc., 1964, 554 pages.
115. Robinson, K.A. et Robinson, J.F.; Contemporary instrumental analysis, Prentice Hall, 2000, 840 pages.

116. Claudel, S.; Mise au point d'un algorithme d'aide à la génération automatique de modèles d'écoulement à compartiments à partir de tracages expérimentaux dans les réacteurs industriels, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, École Nationale Supérieure des Industries Chimiques, 2002.
117. Bussièrès. D., Leclerc, A. et Wang, F.H.; Évaluation de la capacité de complexation des eaux naturelles de la rivière Saguenay, Canada, Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 5, 1992, p. 23-36.
118. Robinson, B.A. et Tester, J.W.; Characterization of flow maldistribution using inlet-outlet tracer techniques: an application of internal residence time distribution, Chemical Engineering Science, Vol. 41, No. 3, 1986, p. 469-483.
119. Luo, J., Cirpka, O.A., Fienen, M.N., Wu, W.W., Mehlhorn, T.L., Carley, J., Jardine, P.M., Criddle, C.S. et Kitanidis, P.K.; A parametric function methodology for analyzing reactive transport in nonuniform flow, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 83, 2006, p. 27-41.
120. Dudukovic, M.P.; Tracer methods in chemical reactors. Technique and applications, NATO ASI series, Serie E, Applied Science, Vol. 110, 1986, p.107-181.
121. Nardi, I.R., Zaiat, M. et Foresti, E.; Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors, Bioprocess Engineering, Vol. 21, 1999, p. 469-476.

## **ANNEXE A**

### **BOUE ROUGE**

#### **A.1 Composition chimique**

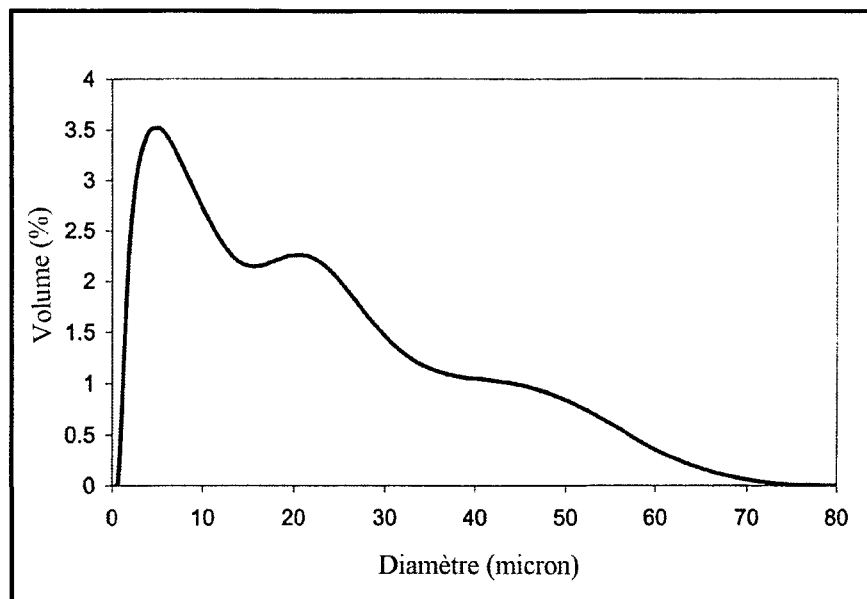
La boue rouge est un sous-produit du procédé Bayer. Elle est principalement constituée de différentes bauxites broyées, insolubles aux conditions de digestion du procédé Bayer, de composés de précipitation issus des réactions chimiques et de liqueur Bayer. Ainsi, la provenance de la bauxite de même que les conditions précises de digestion du procédé en influencent sa composition. Conséquemment, il est impossible de fournir une seule composition de la boue rouge, mais le Tableau A.1 présente une composition chimique typique. Mentionnons que la composition élémentaire est exprimée sous forme d'oxyde et déterminée par spectrométrie de fluorescence X (FRX)<sup>(16)(34)(54)</sup>.

#### **A.2 Granulométrie**

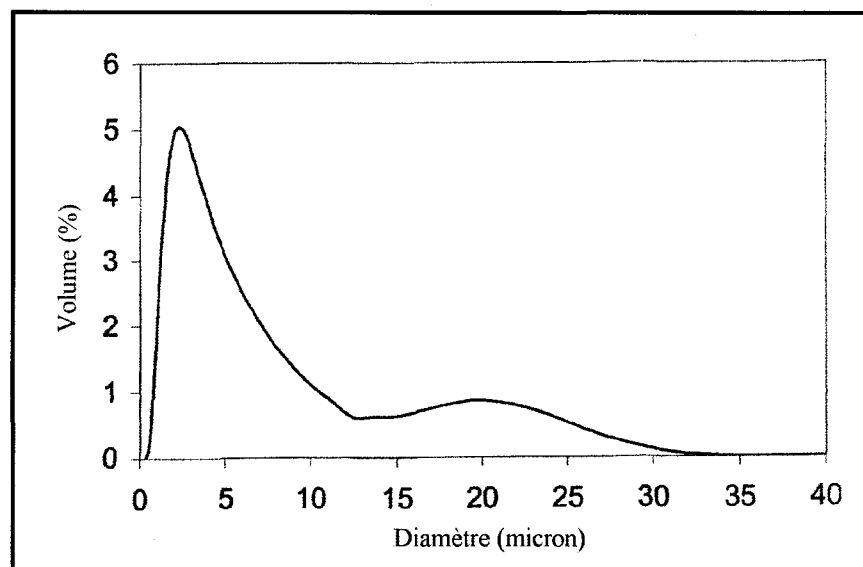
La granulométrie de la boue rouge est variable. En effet, elle est constituée d'un ensemble de particules de grandes tailles telles que le sable ( $250 \times 10^{-6}$  m et plus) et de particules plus fines (1 à  $100 \times 10^{-6}$  m). Règle générale, en raison du broyage et de la digestion de la bauxite, la granulométrie typique de la boue rouge est considérée très fine.



Bien évidemment, la granulométrie varie avec le type de bauxite utilisé et des conditions rencontrées lors de la digestion. Les Figures A.1 et A.2 présentent deux granulométries typiques de la boue rouge.



**Figure A.1 – Distribution granulométrique de la boue rouge # 1**



**Figure A.2 – Distribution granulométrique de la boue rouge # 2**

| Espèce Chimique         | Composition % | Forme minéralogique   |
|-------------------------|---------------|---|
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 30 - 40       | Hématite, goethite  |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 15 - 25       | Sodalite, kaolinite, goethite, boehmite, gibbsite, silico-aluminate de sodium |
| $\text{SiO}_2$          | 10 - 20       | Sodalite, kaolinite, quartz, silico-aluminate de calcium                      |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 5 - 10        | Sodalite  |
| $\text{TiO}_2$          | 3 - 8         | Oxyde de titane, anatase, rutile  |
| $\text{CaO}$            | 1 - 6         | Carbonate de calcium, silico-aluminate de calcium                             |
| Autre                   | 1 - 6         | Oxydes mineurs  |
| $\text{H}_2\text{O}$    | ~ 10          | Eau   |

**Tableau A.1 – Composition chimique typique de la boue rouge**

## **ANNEXE B**

### **LE RÂTEAU**

#### **B.1 Transport de la boue**

Le mécanisme de transport de la boue sous l'action du râteau a sommairement été décrit au Chapitre 3. Considérons un râteau dans une géométrie complémentaire où les lames ont les mêmes dimensions. Le déplacement de la boue s'effectue de la périphérie du réservoir vers la sousverse (centrée) sous forme de spirales concentriques. À chaque passage du râteau, un volume de boue est déplacé radialement vers la sousverse. Si le râteau transporte plus de matériel vers la sousverse que celle-ci peut en pomper, il se forme alors une recirculation du matériel où la boue est retournée dans une couche supérieure aux lames du râteau dans la direction opposée. La limite extrême de ce comportement représente la situation où la boue n'est pas pompée par la sousverse (situation observée lors de l'étape de remplissage du décanteur). Ce phénomène est également observé à plus petite échelle lorsque les lames sont de dimensions similaires. En effet, la quantité de matériel déplacée par les lames extérieures est supérieure à celle des lames inférieures. Par conséquent, l'excédent de boue est déplacé au-dessus de la lame induisant ainsi une forme de micro-mélange du volume de boue déplacé.

Une étude<sup>(59)</sup> expérimentale a observé le déplacement d'un traceur d'encre à l'aide d'un râteau de géométrie complémentaire et dont les lames sont de mêmes dimensions. Les essais ont été réalisés dans un fluide transparent de viscosité similaire à celle d'un lit de boue. Les résultats obtenus démontrent que le phénomène de recirculation, localisé sur chaque lame, induit la dispersion du traceur au fur et à mesure de son déplacement le long du râteau. Dans un cas idéal, le râteau agirait comme un écoulement PFR et transporterait le traceur sans en affecter la distribution. Les résultats démontrent cependant que le traceur, après un passage du râteau, est déplacé vers la sousverse mais de façon plus diffuse et allongée. Autrement dit, le traceur est mélangé à d'autres volumes de boue au fur et à mesure de son déplacement entraînant ainsi sa dispersion. Donc, plus longtemps le traceur est transporté par le râteau, plus la signature obtenue est élargie et aplatie. Cette analyse correspond à ce qui est observé lors de la décomposition des courbes de RTD. La courbe d'écoulement associée à la zone  $r = r$  est beaucoup plus aplatie et élargie que celles associées à  $r = 0$  et  $r = 0,5 r$ . La limite extrême de cet écoulement représenterait un comportement d'écoulement similaire à un CSTR. En résumé, le râteau agit comme aide au transport de la boue en plus d'agir comme un mélangeur.

## **B.2 Bilan massique d'un volume élémentaire annulaire**

Dans le cadre du présent projet, le râteau utilisé doit pouvoir déplacer efficacement la boue vers la sousverse en plus d'aider à la compaction. Un bilan massique des volumes élémentaires annulaires de boue balayés par chacune des lames du râteau est généralement utilisé pour évaluer ces propriétés. Bien évidemment, les mécanismes de transport et de

compaction sont complexes et c'est pourquoi il faut comprendre que les calculs présentés sont une estimation simpliste des phénomènes en présence. Supposons que le transport de la boue s'effectue tel que décrit précédemment<sup>(64)</sup>. À chaque passage du râteau, la lame déplace radialement le volume de boue vers la sousverse. Selon l'équation du bilan massique on observe que :

$$Q_{entrée} C_{entrée} = Q_{sortie} C_{sortie} \quad (\text{Équation B.1})$$

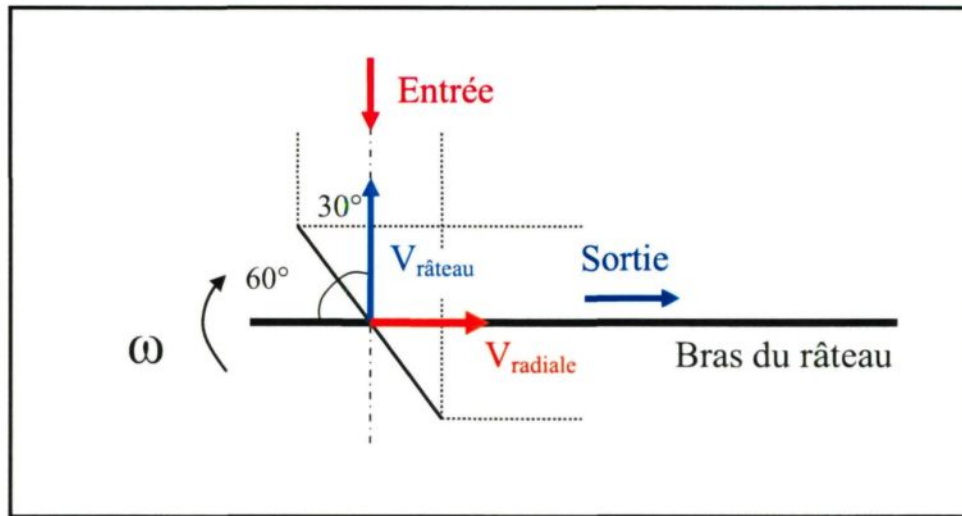


Figure B.1 – Bilan massique sur une lame de râteau

En considérant qu'il n'y a pas de variation de la concentration solide, le débit de boue déplacé par une lame dépend donc de la longueur de la lame ( $L_{lame}$ ), de la hauteur ( $h_{lame}$ ) et de l'angle d'attaque ( $\phi$ ) :

$$Q_{boue} = Aire_{lame} \times V_{radiale} \quad (\text{Équation B.2})$$

La vitesse du râteau (m/s) est obtenue en multipliant la vitesse angulaire  $\omega$  (rad/s) par le rayon de rotation (m) :

$$V_{\text{râteau}} = \omega r \quad \text{(Équation B.3)}$$

$$\omega = 2\pi \times \text{nombre tours} \quad \text{(Équation B.4)}$$

Puisque la vitesse d'entrée de la boue est proportionnelle à la vitesse de rotation du râteau, il est alors possible de calculer la vitesse radiale de la lame :

$$V_{\text{radiale}} = \cot 60 \times V_{\text{râteau}} \quad \text{(Équation B.5)}$$

Dans ces conditions, le débit assuré par le râteau et celui assuré par la gravité doivent être suffisamment importants pour égaler ou surpasser le débit de sousverse afin d'éviter la formation de chemins préférentiels « rat hole ».