

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

Par
Eric Grenon
B. Ing.

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE MESURE
DES COMPOSANTES DE VITESSE
D'UN ÉCOULEMENT DE LIQUEUR BAYER

Avril 2006



Mise en garde/Advice

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

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

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

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

À ma précieuse famille

REMERCIEMENTS

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

Je voudrais premièrement remercier le professeur André Leclerc pour sa patience, ses conseils et son expérience qu'il a su me communiquer. Mes remerciements vont également à monsieur Guy Simard pour avoir été l'instigateur de ce projet, pour m'avoir aidé à le réaliser et avoir été une source d'encouragement tout au long de sa progression.

Je remercie M. Guy Peloquin, chargé de projets au Centre de Recherche et Développement d'Arvida (CRDA), pour ses encouragements et ses conseils lors de l'accomplissement de ce projet.

Je tiens également à remercier les nombreuses personnes qui m'ont accordé leur aide au cours de ce projet, mais tout particulièrement M. Patrice Paquette et M. Serge Gauthier, techniciens à l'UQAC, pour les nombreuses heures de discussion où ils ont su me transmettre une partie de leur précieuse expérience.

Mes remerciements vont finalement au CRSNG et à la société Alcan, pour leur support financier tout au long de mes études de 2^{ième} cycle. Le niveau et la qualité de la recherche appliquée réalisée à l'UQAC bénéficient grandement de la contribution financière et technique de la compagnie Alcan.

SOMMAIRE

Le procédé Bayer est utilisé dans l'industrie de l'aluminium pour extraire l'alumine de la bauxite. Une des étapes critiques de ce procédé est la décantation par gravité des résidus insolubles contenus dans la bauxite préalablement mise en solution. Pour accélérer le processus de décantation, un polymère synthétique coûteux est ajouté dans le puits d'alimentation, situé dans le haut des décanteurs. Les flocons formés par le polymère et les résidus insolubles sont très fragiles en solution. En effet, s'ils subissent une contrainte de cisaillement supérieure à une valeur critique, ils se brisent et le rendement du procédé de décantation est diminué.

Dans le cadre de la maîtrise en ingénierie, ce projet consiste à développer une méthode de mesure de la direction d'un écoulement de pulpe flokulée dans les puits d'alimentation par une méthode électrochimique. Il fait suite à un projet de sonde électrochimique permettant de mesurer l'amplitude de la vitesse d'un écoulement à forte concentration ionique. En plus de cette amplitude, la connaissance de l'orientation de ces vitesses est essentielle à l'optimisation des équipements de flocculation dans le but de maximiser le rendement du procédé de clarification.

Une méthode de mesure employant un cylindre avec une restriction à son extrémité a été développé. La caractérisation du cylindre avec restriction a démontré que cette

méthode pourrait être utilisée dans le but de développer un appareil de mesure adapté à ce milieu industriel. En effet, il a été établi que le courant mesuré par la cellule électrochimique est maximal lorsque l'écoulement est parallèle au cylindre et incident sur l'extrémité avec la restriction. Ainsi, un appareil permettant la maximisation du courant de la cellule électrochimique sur les plans horizontal et vertical permettrait de déterminer la direction d'un écoulement ouvert.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
SOMMAIRE.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	vi
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
NOMENCLATURE	xiii
CHAPITRE 1.....	16
INTRODUCTION	16
1.1- Projet.....	16
1.2- Problématique.....	20
1.2.1- Description du milieu	20
1.2.2- Appareils de mesures existants.....	20
CHAPITRE 2.....	25
PROCÉDÉ BAYER.....	25
2.1- Bauxite.....	25
2.1.2- Composition chimique de la bauxite	27
2.2- Procédé Bayer.....	28
2.2.1- Digestion.....	29
2.2.2- Clarification.....	32
2.2.3- Précipitation.....	34
2.2.4- Calcination.....	37
2.3- Propriétés physiques de la liqueur Bayer	38
2.3.1- Définitions	38
2.3.2- Densité	39
2.3.3- Viscosité	39
2.3.4- Conductivité électrique.....	42
CHAPITRE 3.....	44
PRINCIPES D'ÉLECTROCHIMIE	44
3.1- Introduction	44
3.2- Solution ionique.....	46
3.2.1- Principe d'électroneutralité	46
3.2.2- Force ionique	46

3.2.3- Concept d'activité chimique	47
3.2.4- Solution à force ionique élevée	49
3.3- Électrodes	50
3.3.1- Potentiel standard d'électrodes.....	50
3.3.2- Équation de Nernst	51
3.4- Réactions à l'électrode	52
3.4.1- Réactions chimiques hétérogènes.....	52
3.4.2- Lois de Faraday	53
3.4.3- Polarisation.....	54
CHAPITRE 4.....	60
TRANSPORT EN SOLUTION.....	60
4.1- Flux.....	60
4.2- Mécanismes de transport	61
4.2.1- Migration.....	62
4.2.2- Diffusion.....	63
4.2.3- Convection.....	63
4.2.4- Transport net.....	64
4.3- Concept de la couche de diffusion de Nernst	65
4.4- Théorie de la couche mince	67
CHAPITRE 5.....	69
COMPORTEMENT D'UN ÉCOULEMENT EN PRÉSENCE D'UN OBSTACLE	69
5.1- Écoulement autour d'un corps immergé.....	69
5.1.1- Caractéristiques générales des écoulements ouverts	70
5.1.2- Caractéristiques d'un écoulement contournant un objet	71
5.1.3- Écoulement autour d'un cylindre (sphère)	75
5.2- Écoulement visqueux en conduit.....	77
5.2.1- Principes généraux.....	78
5.2.2- Pertes de charge	82
CHAPITRE 6.....	90
MÉTHODOLOGIE EXPÉIMENTALE ET RÉSULTATS.....	90
6.1- Présentation du banc d'essai.....	91
6.1.1- Modifications effectuées au montage expéimental	92
6.2- Système de prise de mesures	94
6.3- Électrolyte.....	95
6.4- Prototypes de sondes testés	96
6.4.1- Électrodes libres	96
6.4.2- Utilisation d'une sphère.....	101
6.4.3- Utilisation d'un cylindre	116
6.4.4- Utilisation d'une restriction couplée au cylindre.....	124

CHAPITRE 7	135
APPLICATION DE LA MÉTHODE	135
7.1- Validation de la méthode en laboratoire.....	136
7.2- Prototype pour test en usine	139
7.2.1- Description du prototype	139
7.2.2- Protocole d'expérimentation en usine	142
7.2.3- Essai à l'usine Alcan Vaudreuil de Jonquière	143
7.2.4- Observations et conclusions sur le prototype.....	147
CONCLUSION.....	150
BIBLIOGRAPHIE.....	153

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Décanteur de boue rouge [2]	17
Figure 1.2 Schéma d'un décanteur.	18
Figure 1.3 Arrangement des transducteurs pour la vélocimétrie 3D ultrasonique	22
Figure 1.4 Principe du tube de Pitot (a), Tube de Pitot à 5 trous (b).....	23
Figure 1.5 Montage à 3 fils chauds (a), Montage à 4 fils chauds (b)	24
Figure 2.1 Diagramme du procédé Bayer [13]	28
Figure 2.2 Schéma d'une unité de broyage.....	29
Figure 2.3 Processus de digestion.....	31
Figure 2.4 Étapes de filtration [4].....	34
Figure 2.5 Schéma détaillé de l'étape de précipitation.....	35
Figure 2.6 Viscosité <i>vs</i> température pour une [NaOH] de 100 g/L et A/C: 0.60 [16].....	40
Figure 2.7 Viscosité <i>vs</i> température pour une [NaOH] de 250 g/L et A/C: 0.60 [16].....	41
Figure 2.8 Viscosité <i>vs</i> [NaOH] à 50 °C.....	42
Figure 2.9 Conductivité électrique <i>vs</i> la température	43
Figure 3.1 Graphe du courant <i>vs</i> potentiel.....	57
Figure 4.1 Couche de diffusion de Nernst	66
Figure 4.2 Couche limite hydrodynamique [4].....	68
Figure 5.1 Contraintes normales p (a) et contraintes de cisaillement τ_w (b).....	70
Figure 5.2 Force de trainée C_d et de montée C_L	71
Figure 5.3 Caractéristiques d'un écoulement autour d'une tige mince pour: (a) un petit nombre de Reynolds, (b) un nombre de Reynolds moyen et (c) un nombre de Reynolds élevé [22]	73

Figure 5.4 Caractéristiques d'un écoulement autour d'un cylindre pour: (a) un petit nombre de Reynolds, (b) un nombre de Reynolds moyen et (c) un nombre de Reynolds élevé [22]	76
Figure 5.5 (a) Écoulement en conduite pleine. (b) Écoulement en canal ouvert.....	78
Figure 5.6 Type d'écoulement.....	79
Figure 5.7 Région d'entrée et région développée à l'intérieur d'une conduite [22].....	80
Figure 5.8 Distribution de pression dans un tuyau	81
Figure 5.9 Table de Moody.....	84
Figure 5.10 Profil du fluide à l'entrée et coefficient de perte pour (a) réentrant, $K_L = 0.8$, (b) arrête vive, $K_L = 0.5$, (c) légèrement arrondi, $K_L = 0.2$, (d) très arrondi, $K_L = 0.04$	85
Figure 5.11 Profil d'écoulement et distribution de pression pour une entrée à arrête vive. [22].....	86
Figure 5.12 Coefficient de perte à l'entrée en fonction du rayon de courbure de l'entrée..	87
Figure 5.13 Coefficient de perte à la sortie pour (a) réentrant, $K_L = 1.0$, (b) arrête vive, K_L = 1.0, (c) légèrement arrondi, $K_L = 1.0$, (d) très arrondi, $K_L = 1.0$	88
Figure 5.14 Coefficient de perte pour (a) une contraction soudaine, (b) une expansion soudaine.	88
Figure 5.15 Coefficient de perte pour un diffuseur conique typique.....	89
Figure 6.1 Banc d'essai.....	92
Figure 6.2 Montage « électrodes libres ».....	97
Figure 6.3 Courant de la sonde « électrodes libres » en fonction du temps lors d'une prise de mesure sur banc d'essai.....	98
Figure 6.4 Sonde sphérique	102
Figure 6.5 Courant de la cellule électrochimique en fonction de la tension appliquée	104
Figure 6.6 Schéma de connexion des électrodes	105
Figure 6.7 Courant des cellules électrochimiques en fonction du cas étudié	107
Figure 6.8 Angle des électrodes par rapport à l'écoulement sur un plan horizontal	109
Figure 6.9 Courant de la sonde sphérique en fonction de son angle par rapport à l'écoulement.....	110

Figure 6.10 Courant de la sonde sphérique mesuré pour trois longueurs de cathode en fonction de l'angle de la sonde par rapport à l'écoulement.....	114
Figure 6.11 Sonde cylindrique.....	118
Figure 6.12 Angle de la sonde par rapport à l'écoulement sur un plan horizontal.....	120
Figure 6.13 Courant de la sonde cylindrique en fonction de son orientation par rapport à l'écoulement.....	122
Figure 6.14 Restriction employée avec la sonde cylindrique.	125
Figure 6.15 Angle de la sonde avec restriction par rapport à l'écoulement sur un plan horizontal	126
Figure 6.16 Courant de la sonde cylindrique avec restriction en fonction de son orientation par rapport à l'écoulement	128
Figure 6.17 Angle de la sonde avec restriction par rapport à l'écoulement sur un plan vertical	131
Figure 6.18 Courant de la sonde cylindrique avec restriction face à l'écoulement (0 degré) en fonction de l'orientation de la sonde sur un plan vertical	132
Figure 6.19 Courant de la sonde cylindrique avec restriction en sens opposé à l'écoulement (180 degrés) en fonction de l'orientation de la sonde sur un plan vertical ...	133
Figure 7.1 Montage expérimental.....	136
Figure 7.2 Courant vs position de la sonde en rotation	137
Figure 7.3 Schéma et figure du prototype.....	140
Figure 7.4 Panneau de contrôle de la sonde.....	141
Figure 7.5 Matériel employé pour le test en usine.....	143
Figure 7.6 Puits d'alimentation vue de haut	144
Figure 7.7 Puits d'alimentation vue de côté	145

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Principaux constituants de la bauxite [4]	27
Tableau 2.2 Densité vs concentration de NaOH.....	39
Tableau 6.1 Caractéristiques de la carte d'acquisition de données	95
Tableau 6.2 Courant moyen des électrodes vs vitesse à 7 cm/s	99
Tableau 6.3 Courant moyen des électrodes vs vitesse à 35 cm/s	99
Tableau 6.4 Moyenne du courant moyen des électrodes vs vitesse	100
Tableau 6.5 Courant de la sonde sphérique en fonction de différentes longueurs de cathode	115
Tableau 7.1 Analyse de la liqueur de EB1	144

NOMENCLATURE

Lettres italiques

<i>a</i>	Activité	$mol \cdot m^{-3}$
<i>A</i>	Aire	m^2
<i>c</i>	Concentration	$mol \cdot m^{-3}$
<i>D</i>	Diamètre	m
<i>D</i>	Coefficient de diffusion	$m^2 \cdot s^{-1}$
<i>D</i>	Force de trainée	N
<i>E</i>	Champ électrique	$V \cdot m^{-1}$
<i>E</i>	Potentiel d'électrode	V
<i>f</i>	Facteur de friction Darcy	-
<i>F</i>	Constante de Faraday	$96485 C \cdot mol^{-1}$
<i>g</i>	Constante gravitationnelle	$9.81 m \cdot s^{-2}$
<i>G</i>	Énergie libre de Gibbs	$kJ \cdot kg^{-1}$
<i>h_L</i>	Perte de charge	m
<i>i</i>	Densité de courant électrique	$A \cdot m^{-2}$
<i>I</i>	Courant électrique	A
<i>j_i</i>	Densité de flux de matière	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
<i>J_i</i>	Flux total de matière	$mol \cdot s^{-1}$

k	Coefficient de transfert de masse	$m \cdot s^{-1}$
k_B	Constante de Boltzmann	$1.3807 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$
K_L	Coefficient de perte	-
l	Longueur	m
l_e	Longueur d'entrée	m
Z	Force de montée	N
m	Masse	kg
n	Nombre d'électrons transférés	-
N	Nombre de moles	mol
p	Contrainte normale ou pression	Pa
R	Constante universelle des gaz	$8.3144 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
R_{sol}	Résistance électrique	Ω
T	Température	K
u_i	Mobilité	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$
U	Vitesse	$m \cdot s^{-1}$
v	Vitesse moyenne	$m \cdot s^{-1}$
w	Travail ou énergie	J
z	Nombre de charge	-

Lettres grecques

α	Facteur de symétrie	-
δ	Épaisseur de couche	m
ϕ	Potentiel électrique	V
γ	Coefficient d'activité	-
η	Surpotentiel	V
κ	Conductivité électrique	$S \cdot m^{-1}$
μ_i	Mobilité	$m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$
μ	Force ionique	$mol \cdot m^{-3}$
μ_d	Viscosité dynamique	$Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
θ	Angle	deg
ρ_i	Densité volumique de charge	$C \cdot m^{-3}$
ρ	Masse volumique	$Kg \cdot m^{-3}$
τ	Contrainte de cisaillement	Pa
ν	Viscosité cinématique	$m^2 \cdot s^{-1}$

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds	$\frac{\rho U l}{\mu_d}$
----	--------------------	--------------------------

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1- Projet

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant de l'écorce terrestre (8.1% massique). Il ne se trouve toutefois pas à l'état pur dans la nature. Pour cette raison, il est produit en industrie à l'aide du procédé Hall-Héroult [1]. Ce dernier est, à l'heure actuelle, le seul procédé employé à l'échelle industrielle pour produire de l'aluminium. Dans ce procédé, l'aluminium est obtenu par une réduction électrolytique d'alumine (Al_2O_3) dissoute dans un bain composé en majeur partie de cryolite (Na_3AlF_6).

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer. Ce dernier fut développé par Karl Josef Bayer et breveté en 1888. Ce procédé nécessite environ 4 tonnes de bauxite pour produire 2 tonnes d'alumine. L'extraction de l'alumine de la bauxite s'effectue en 4 étapes : la digestion, la clarification, la précipitation et la calcination.

Une des étapes du procédé est la clarification. Cette étape consiste à séparer la liqueur Bayer, qui contient l'aluminate en solution, des résidus solides. Les résidus forment une boue dont la couleur rouge provient d'oxydes présents dans la bauxite. La séparation s'effectue à l'aide d'un circuit de plusieurs décanteurs. Les décanteurs sont de grands réservoirs de forme cylindrique pouvant atteindre 33 mètres de diamètre (figure 1.1).



Figure 1.1 Décanteur de boue rouge [2]

La liqueur est recueillie à la surverse d'un décanteur et la boue est pompée à la sousverse ce dernier. La surverse du premier décanteur est filtrée et acheminée à l'étape de précipitation tandis que sa sousverse est transférée vers un autre décanteur. La surverse des autres décanteurs est acheminée au décanteur en amont et la sousverse au décanteur en aval. À la sortie du dernier décanteur de l'étape de clarification, les rejets de la sousverse sont dirigés vers des sites d'entreposage.

Le décanteur est alimenté par le puits d'alimentation, situé dans sa partie supérieure (figure 1.2). Le processus de séparation solide/liquide entre la boue et la liqueur Bayer est accéléré par l'ajout de floculants synthétiques, dont le rôle consiste à agglomérer les fines particules sous forme de flocons. L'accumulation des couches successives de flocons dans la partie inférieure du décanteur forme la boue. Le compactage et l'évacuation de la boue sont ensuite accélérés par l'action de grandes structures rotatives, appelées «râteaux», placées tout au fond des décanteurs. Ces râteaux peuvent être de formes et de tailles diverses selon les usines [3].

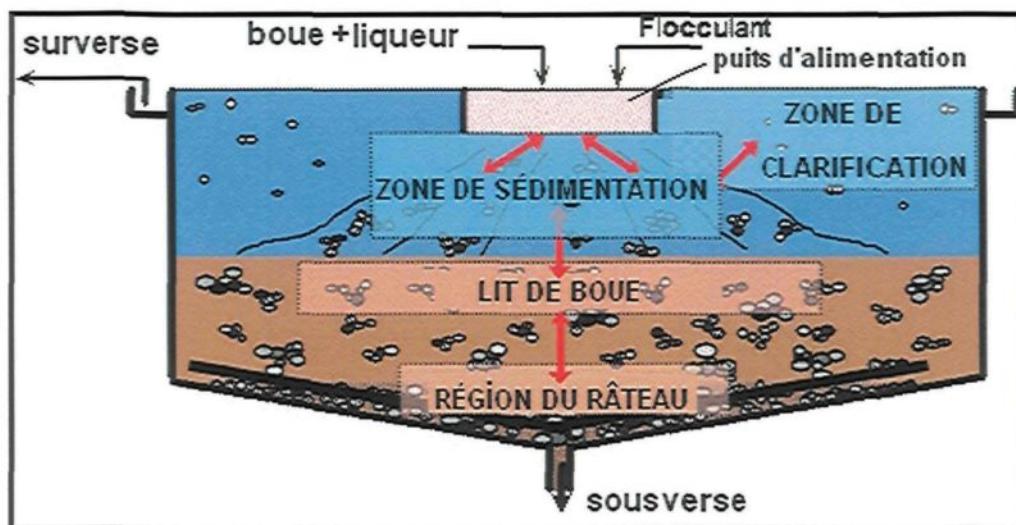


Figure 1.2 Schéma d'un décanteur.

La conception d'équipements de flocculation comporte certaines problématiques. Un facteur déterminant dans ce type de conception est la fragilité des flocons formés. En effet, la structure de ces derniers est soumise aux contraintes de cisaillement des écoulements

dans la zone de sédimentation et dans le puits d'alimentation. Le niveau de cisaillement est principalement contrôlé par le gradient de vitesse du fluide dans le puits d'alimentation.

Dans le cadre de la maîtrise en ingénierie, ce projet consiste à développer une méthode de mesure de la direction d'un écoulement de pulpe flokulée dans les puits d'alimentation par une méthode électrochimique. Il fait suite à un projet de sonde électrochimique permettant de mesurer l'amplitude de la vitesse d'un écoulement à forte concentration ionique [4, 5, 6]. La connaissance de ces vitesses en grandeur et direction est essentielle à l'optimisation des équipements de flocculation dans le but de maximiser le rendement du procédé de clarification.

L'optimisation de la flocculation dans les puits d'alimentation permet de réduire la consommation de floculants synthétiques coûteux. Un meilleur compactage des résidus à la sousverse permet un gain de la concentration de matières solides et diminue les pertes en liquide évacué avec la boue. Ce gain d'efficacité entraîne une amélioration en termes de gestion routinière des sites d'empilement des résidus de boue rouge de même qu'une augmentation de leur longévité (un empilement plus compact nécessite un volume de disposition plus restreint). Une connaissance des vitesses de la suspension flokulée à l'intérieur du décanteur est donc essentielle pour apporter des modifications aux équipements de flocculation afin de maximiser le rendement du procédé de flocculation.

1.2- Problématique

1.2.1- Description du milieu

La méthode de mesure est destinée à être utilisée dans les puits d'alimentation des décanteurs. Ces derniers sont alimentés de pulpe de boue rouge. La pulpe est composée principalement de liqueur Bayer et de particules en suspension. La taille moyenne des particules présentes dans la pulpe varie. Le Centre de Recherche et de Développement d'Arvida (Alcan) a déterminé, selon une courbe de distribution de la granulométrie de la boue rouge, que la taille moyenne des particules variait environ de 1 à 10 microns. Ce type de suspension est régie à la fois par la diffusion Brownienne et la force de gravité. Ainsi, l'énergie produite par les collisions entre les particules de solide et les particules du liquide suffisent à maintenir la suspension. La décantation de la solution est donc très lente. Pour cette raison, un floculant synthétique est injecté à la pulpe dans le but d'augmenter l'agglomération des particules solides et en augmenter la vitesse de sédimentation. La vitesse de sédimentation des flocons est de l'ordre de 0.06 à 3 cm/s et la vitesse du fluide dans le puits d'alimentation des décanteurs est de l'ordre de 2 à 60 cm/s. La température de la solution varie entre 20 et 105°C et sa concentration en hydroxyde de sodium (NaOH) est située entre 20 et 250 g/L dans les différents décanteurs.

1.2.2- Appareils de mesures existants

Dans le cadre du développement d'une méthode de mesure de vélocimétrie unidirectionnelle [4], une recherche fut effectuée sur les appareils disponibles pour

mesurer la vitesse d'un écoulement. Le débitmètre électromagnétique, le débitmètre Coriolis, le débitmètre ultrasonique, le débitmètre à effet Doppler, le débitmètre à différence de pression et le débitmètre mécanique furent notamment envisagés mais rejetés, car ces débitmètres mesurent tous un écoulement confiné à un conduit. Dans le cadre du même projet, une méthode mécanique (turbine) et des méthodes électromagnétiques (effet Hall et Faraday) furent également étudiées en laboratoire et en usine pilote sans succès. Une méthode de mesure de vélocimétrie électrochimique a alors été développée et étalonnée pour mesurer la vitesse d'un écoulement de liquide Bayer unidirectionnel. Différentes méthodes de mesures des composantes de vitesse tridimensionnelles furent étudiées dans le but d'en connaître le principe de fonctionnement.

1.2.2.1- Mesure de vélocimétrie 3D par méthode ultrasonique

Cette méthode permet la mesure simultanée de plus d'une composante de la vitesse de particules transportées par le fluide. Elle emploie 3 ou 4 transducteurs dont un seul est utilisé comme émetteur. Les autres reçoivent l'écho provenant des particules. La figure 1.3 décrit l'arrangement des transducteurs pour une mesure tridimensionnelle [7].

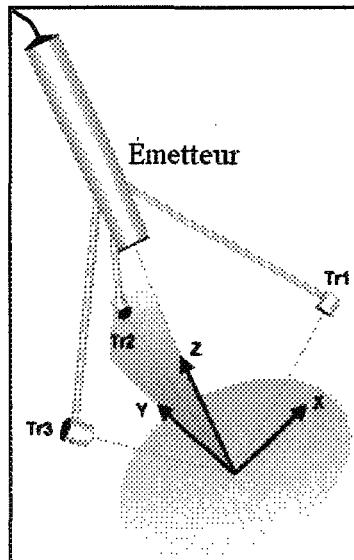


Figure 1.3 Arrangement des transducteurs pour la vélocimétrie 3D ultrasonique

La position des points mesurés est déterminée par la durée que prend l'écho à atteindre les récepteurs. L'analyse des signaux d'écho provenant des récepteurs à différents temps permet de déterminer la direction des particules de même que leur vitesse à l'intérieur du volume de contrôle formé par les transducteurs. Cette méthode est toutefois inapplicable dans le cas présentement étudié puisque la vitesse de déplacement du liquide est requise et non la vitesse de déplacement des particules de boue.

1.2.2.2- Mesure de vélocimétrie 3D par tube de Pitot

Grâce à l'équation de Bernoulli, il est possible de calculer la vitesse d'un fluide en connaissant la pression de stagnation et la pression statique de ce dernier en un point donné. Ce principe est utilisé dans les tubes de Pitot. La pression de stagnation et la pression statique sont mesurées à l'aide de ce dernier et la différence entre ces pressions permet de

calculer la vitesse du fluide. Un arrangement particulier permet de mesurer la direction d'un écoulement multidimensionnel. Le tube de Pitot à 5 trous est couramment utilisé dans ce cas précis. Différents travaux ont été effectués dans le but de calibrer cet appareil [8, 9]. Cette méthode ne peut toutefois pas être employée dans les présents travaux car le milieu dans lequel la sonde sera immergée n'est pas propice pour une telle méthode, dû à la présence des particules qui peuvent obturer les orifices du tube de Pitot.

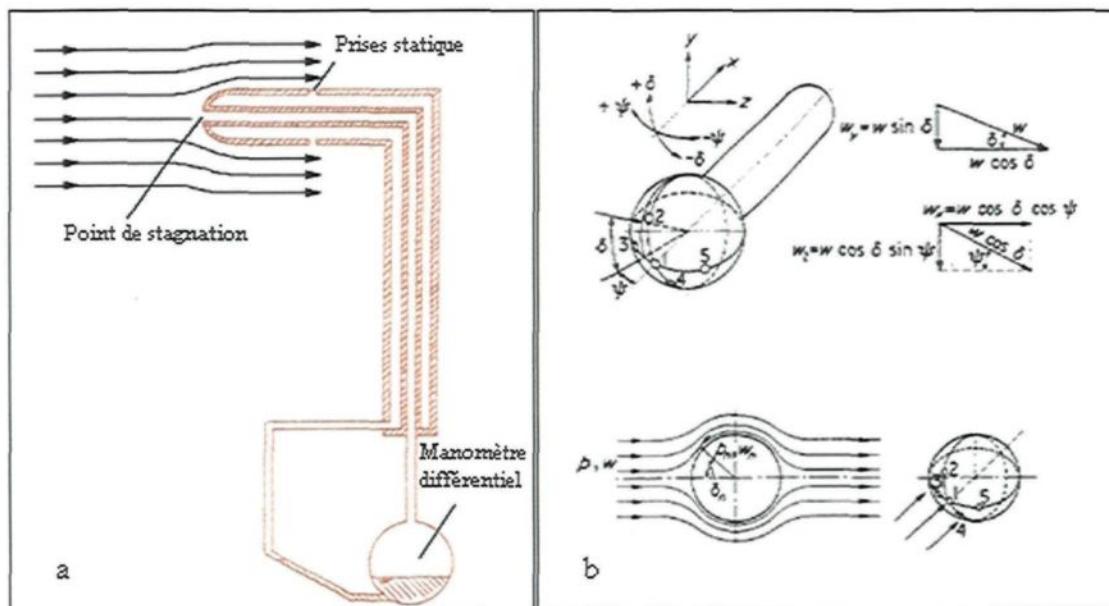


Figure 1.4 Principe du tube de Pitot (a), Tube de Pitot à 5 trous (b)

1.2.2.3- Mesure de velocimétrie 3D par fil chaud

Il est possible de trouver dans la littérature différentes méthodes de mesure des composantes de vitesse d'un fluide par fil chaud. Paulsen [10] présente une méthode de mesure à l'aide de trois fils chauds. Des relations sont posées entre l'angle des fils chaud par rapport à l'écoulement et les facteurs de refroidissement effectifs relatifs à la vitesse de

l'écoulement. Dans le même ordre d'idées, Wittmer, Devenport et Zsoldos [11] ont développé une méthode de mesure de la direction de l'écoulement à l'aide d'une sonde à quatre fils chauds. Les arrangements des fils chauds des méthodes présentées précédemment sont montrés à la figure 1.5. Bien que la méthode électrochimique et la méthode du fil chaud soient différentes, il est possible d'établir des liens entre elles. Ainsi, l'angle entre l'écoulement et le fil chaud influence les mesures de ce dernier tout comme l'angle entre les électrodes et l'écoulement influence les courants mesurés à l'aide de la méthode électrochimique.

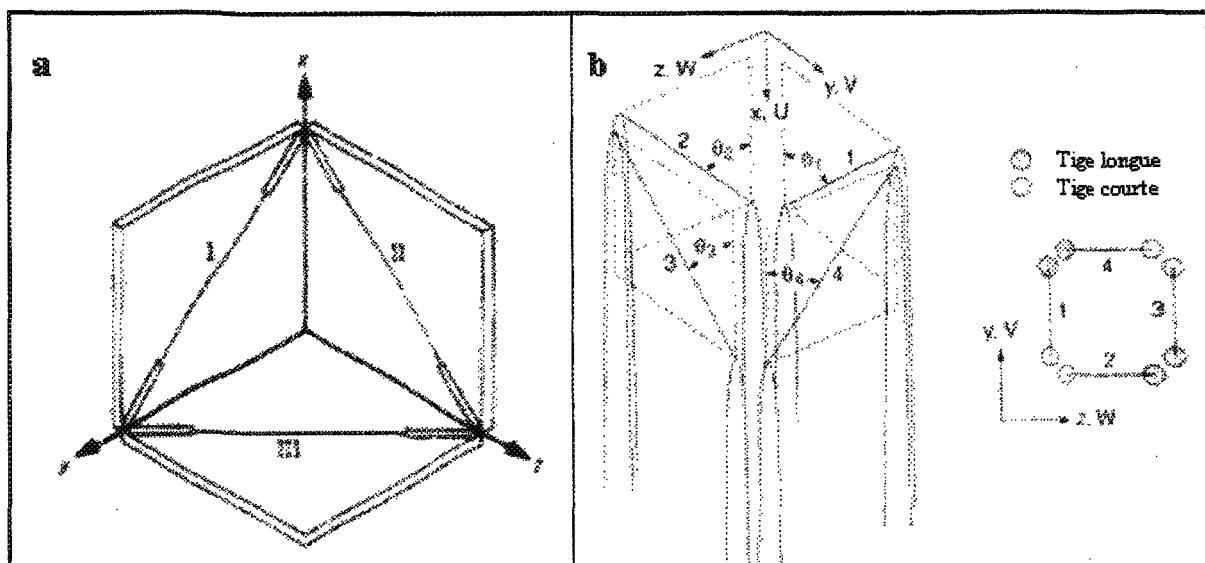


Figure 1.5 Montage à 3 fils chauds (a), Montage à 4 fils chauds (b)

CHAPITRE 2

PROCÉDÉ BAYER

Un survol du procédé Bayer a été effectué au chapitre 1. Les détails de ce procédé seront exposés dans ce chapitre. De plus, les caractéristiques de la liqueur Bayer seront présentées à la suite de cette section.

À quelques exceptions près, la totalité de l'alumine utilisée en industrie est fabriquée à l'aide du procédé Bayer. Les principaux aspects de ce procédé sont encore aujourd'hui les mêmes que ceux inventés et brevetés par Karl Josef Bayer en Autriche en 1888. La bauxite, qui est la matière première employée dans ce procédé, est le minerai le plus rentable à exploiter industriellement dans le but d'obtenir l'alumine.

2.1- Bauxite

La bauxite n'est pas une substance minéralogique homogène. Ce terme définit un minerai, ou un mélange de substances minérales, essentiellement constitué d'hydrates

d'alumine, d'oxydes de fer, de silicate d'alumine et d'oxyde de titane. L'hydrate d'alumine se retrouve sous différentes espèces à l'intérieur de la bauxite [12] :

- la monohydratée ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) existe en deux variétés cristallographique : le type diaspose et le type boehmite;
- la trihydratée ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$) est dénommée hydrargillite, ou plus généralement *gibbsite*.

La qualité commerciale d'une bauxite provient principalement des concentrations relatives de ces trois hydrates. En effet, ils diffèrent essentiellement par leur solubilité dans les lessives de soude caustique, laquelle est à la base du procédé industriel d'extraction de l'alumine.

Les formes monohydratées de l'hydrate d'alumine sont difficilement solubles : le type boehmite n'est réellement soluble qu'à des températures voisines de 100°C tandis que le type diaspose est très peu soluble aux températures inférieures à 250°C.

La forme trihydratée est beaucoup plus facile à extraire que la monohydratée. En effet, elle est très soluble dès une température voisine de 100°C. Pour cette raison, ce type d'alumine est beaucoup plus rentable à exploiter. En général, ce type d'alumine se retrouve dans des bauxites présentes en régions tropicales.

2.1.2- Composition chimique de la bauxite

La composition chimique de la bauxite est très variable suivant le type de l'hydrate de base, la proportion d'oxyde de fer et de silicate d'alumine. En général, la concentration en trihydrate d'alumine est de l'ordre de 45%. La fraction restante est principalement constituée d'eau (~30%) et de différentes impuretés présentes dans la bauxite: principalement des oxydes de fer, de silice et de titane. En dehors de ces constituants principaux, les bauxites contiennent des impuretés en très grand nombre, en quantités variables mais généralement très faibles. Il y a le calcium, présent sous forme de carbonate, une multitude d'éléments chimiques présents en très faible proportion et finalement un peu de matière organique ou humique, qu'on peut caractériser par la quantité de carbone organique contenu. Le tableau 2.1 donne les principaux constituants de la bauxite.

Pourcentage	Constituant	Forme
53.4	Al_2O_3 (disponible)	Trihydrate
30	H_2O	
5.6	Fe_2O_3	Goethite, hematite
3.6	Al_2O_3 (non disponible)	Monohydrate
2.8	TiO_2	
2.5	SiO_2 (réactive)	$\text{Al}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Total : 97.9		

Tableau 2.1 Principaux constituants de la bauxite [4]

2.2- Procédé Bayer

L'extraction de l'alumine de la bauxite nécessite quatre étapes : la digestion, la clarification, la précipitation et la calcination. La figure 2.1 montre un exemple typique de diagramme du procédé Bayer.

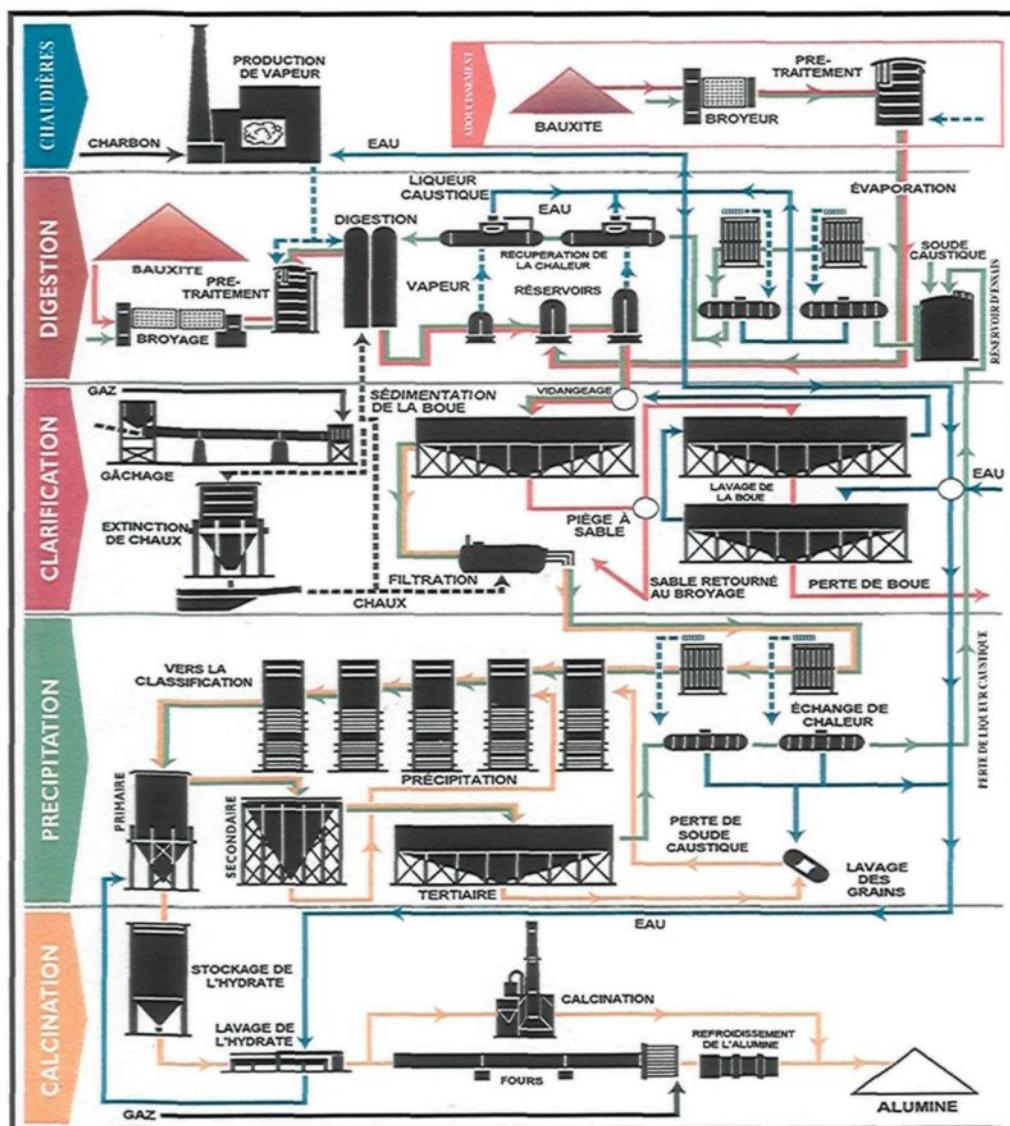


Figure 2.1 Diagramme du procédé Bayer [13]

2.2.1- Digestion

2.2.1.1- Broyage de la bauxite

Cette étape est nécessaire dans le but de faciliter la mise en solution de l'alumine contenue dans la bauxite. Le minerai est broyé, tamisé et les morceaux de minerai trop gros sont recirculés vers l'entrée de l'unité de broyage. Il est important de bien calibrer le procédé puisqu'un broyage trop grossier impliquera que l'alumine ne sera pas complètement extraite de la bauxite tandis qu'un broyage trop fin signifie que trop d'énergie a été dépensée, augmentant ainsi les coûts du procédé. La figure 2.2 présente le schéma d'une unité de broyage.

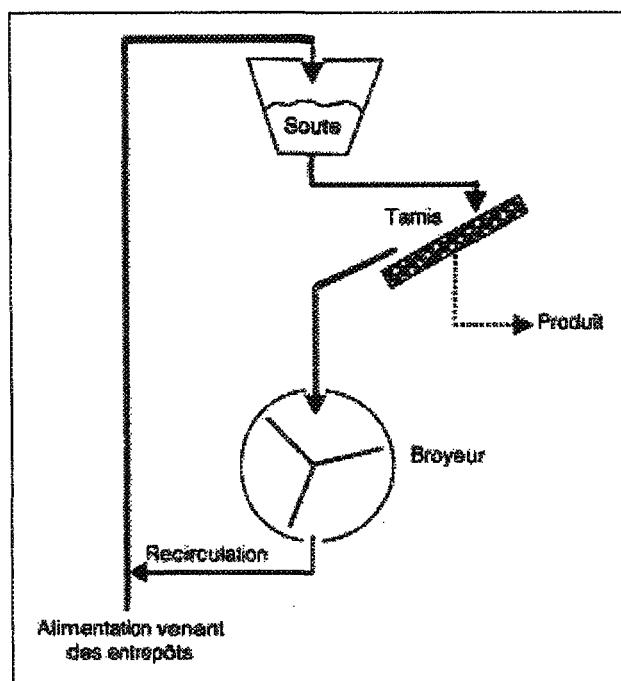


Figure 2.2 Schéma d'une unité de broyage.

2.1.1.2- Pré-traitement

Cette étape survient avant la digestion. De la chaux est ajoutée à la bauxite broyée ainsi que de la liqueur usée arrivant des décanteurs de l'étape subséquente de clarification. Ce mélange produit une pulpe de bauxite contenant environ 50% de solides. Cette pulpe est à une température de 85°C à la sortie de cette tour. On ajoute de la chaux à la bauxite pour deux raisons. Premièrement, elle favorise la précipitation du phosphate extrait de la bauxite. De plus, elle prévient ou diminue le taux de précipitation de l'hydrate d'alumine durant la clarification.

2.1.1.3- Digestion

À cette étape, l'alumine présente dans la bauxite est solubilisée dans une solution de caustique. Cette étape s'avère cruciale pour le procédé. La figure 2.3 présente le processus de digestion. La pulpe provenant du pré-traitement est à une température de 85°C. Elle est injectée à l'intérieur d'autoclaves verticaux, où la pulpe est brassée dans la liqueur Bayer usée provenant de l'étape de clarification jusqu'à une température de plus de 250°C et sous une pression jusqu'à 3500 kPa [14, 15].

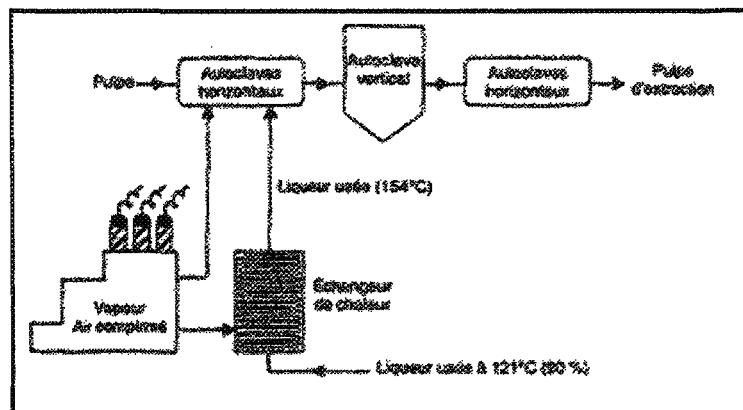


Figure 2.3 Processus de digestion.

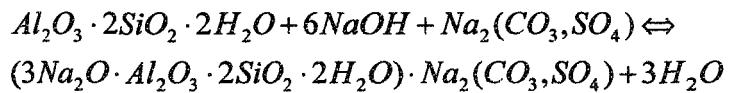
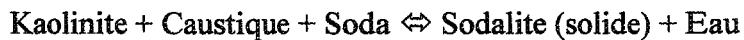
Le mélange sortant, appelé pulpe d'extraction et composé d'alumine dissoute et de résidus solides de bauxite, est refroidi jusqu'à 100 °C dans une série de condenseurs. La vapeur récupérée des réservoirs de refroidissement est finalement utilisée pour préchauffer la liqueur Bayer entrant dans les autoclaves [3].

Lors de la digestion, les deux principales réactions chimiques rencontrées sont les suivantes [4] :

- La mise en solution dans la liqueur Bayer de l'alumine tri-hydraté :



- La dissolution de l'argile présente dans la bauxite sous forme de kaolinite suivie de la précipitation de cette dernière dans la liqueur pour former le produit de désilication (sodalite) :



Lors de l'étape de la clarification, la sodalite solide formée par l'attaque de l'argile avec le caustique durant la digestion est évacuée avec la boue. Il en résulte une perte de caustique à cette étape du procédé. Cette perte est estimée à une tonne de caustique perdu par tonne de silice réactive (définie comme étant la proportion de SiO_2 réagissant avec le caustique) [4]. Les coûts de productions augmentent ainsi lorsque la quantité de silice réactive présente dans la bauxite augmente. Pour obtenir une bonne désilication, la durée de digestion doit être de l'ordre d'une heure. Le produit obtenu à la sortie de la digestion se nomme la pulpe d'extraction.

2.2.2- Clarification

L'étape de la clarification consiste à séparer dans la liqueur Bayer l'aluminate en solution des résidus solides qui s'y trouvent sous forme de fines particules et de sable. Ces résidus forment une boue dont la couleur rouge provient d'oxydes présents dans la bauxite.

Selon la classification géologique, les boues correspondent à des super colloïdes dont le diamètre des particules en suspension se situe entre 1 et 10 microns [14].

Avant d'être amenée au décanteur, la pulpe d'extraction passe par trois détendeurs qui abaissent la pression relative de la pulpe à 140 kPa, 70 kPa et 7 kPa. Cette détente produit une vapeur qui est réutilisée pour réchauffer la liqueur usée. Par la suite, la pulpe d'extraction est dirigée vers les décanteurs pour extraire les impuretés insolubles, soient le Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, ... [4].

Les décanteurs sont de grands réservoirs cylindriques pouvant atteindre 33 mètres de diamètre. Un floculant synthétique est injecté à la pulpe d'extraction pour faciliter l'agglomération des particules solides et ainsi en augmenter la vitesse de sédimentation. La principale problématique dans le procédé de flocculation est la fragilité des flocons formés. Ces derniers se brisent lorsqu'ils subissent une contrainte de cisaillement au dessus d'une valeur critique. Il en résulte une diminution de rendement pour l'étape de la décantation.

Le lavage de la boue est réalisé dans un système à contre-courant, composé de plusieurs décanteurs placés en série. La liqueur recueillie à la surverse d'un décanteur est dirigée vers l'alimentation du décanteur situé en amont, tandis que la boue recueillie à la sousverse est orientée vers l'alimentation du décanteur situé en aval. À chaque stade, la boue et la liqueur sont mélangées, ce qui a pour effet d'enrichir la liqueur ascendante en aluminate et en caustique, en plus de laver la boue descendante. La liqueur Bayer, enrichie d'aluminate, est récupérée à la surverse du premier décanteur pour être filtrée et dirigée

vers l'étape de la précipitation, pendant que la boue lavée est pompée de la sousverse du dernier décanteur vers les sites d'entreposage [3].

2.2.3- Précipitation

2.2.3.1- Filtration

Après avoir été clarifiée, la liqueur Bayer provenant de la surverse du premier décanteur du circuit de boue entre dans le processus de filtration et précipitation, à la fin duquel elle sera refroidie dans des réservoirs ouverts. Du lait de chaux est ajouté pour agir comme aide filtrant à la sortie des décanteurs. La filtration s'effectue sous une pression de 400 kPa. À la sortie des filtres, la solution se nomme liqueur mère et sa température est de 107°C. Les impuretés retenues par le filtre sont dirigées vers le site de traitement des boues rouges.

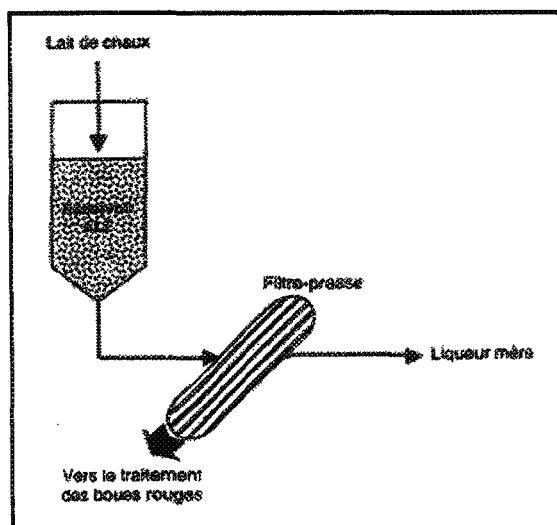


Figure 2.4 Étapes de filtration [4]

2.2.3.2- Précipitation et séparation de l'hydrate d'aluminium

La liqueur mère provenant de la filtration est d'abord refroidie entre 47°C et 85°C dans un détendeur récupérant la vapeur afin de réchauffer la liqueur usée retournant vers les autoclaves. La liqueur mère est par la suite entreposée dans des réservoirs. À l'intérieur de ces derniers, la liqueur est mise en contact avec de petits cristaux d'hydrate d'alumine servant de noyaux de nucléation afin de provoquer la précipitation de l'hydrate d'alumine en solution sous forme de cristaux. Ces derniers seront ensuite séparés selon leur taille dans des réservoirs de classification. Les cristaux de première classification, c'est-à-dire les plus gros, sont récupérés pour passer à l'étape de la calcination, alors que les autres sont retournés aux précipitateurs pour servir d'amorce en tant que noyaux de nucléation [3]. Un schéma détaillé de l'étape de précipitation se trouve à la figure 2.5.

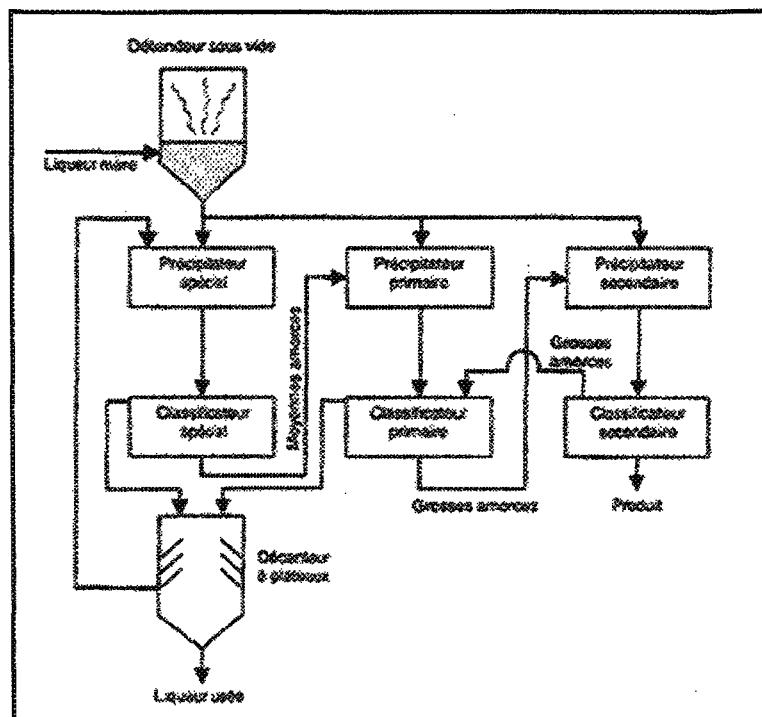
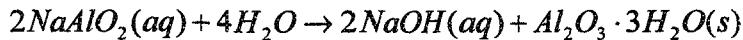


Figure 2.5 Schéma détaillé de l'étape de précipitation

La réaction chimique de précipitation est :



Lors de la précipitation, la solution est légèrement agitée de manière à uniformiser les sites de germination dans le liquide. La réaction de précipitation nécessite de 20 à 80 heures.

Il y a trois types de précipitateurs qui alimentent chacun un classificateur [4].

- Le précipiteur spécial reçoit les plus petites amorces provenant du décanteur à plateaux. La suspension 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 précipiteur 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 précipiteur 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.

Le décanteur à plateaux est un réservoir permettant la séparation des plus fines particules d'hydrate. Le temps de décantation des particules submicroniques prend plusieurs jours. La succession des plateaux minimise la distance et par le fait même le temps de décantation. Les sousverses des plateaux contiennent les particules submicroniques qui sont dirigées vers le précipitateur principal. Les surverses des plateaux contiennent de la liqueur usée qui est recyclée.

2.2.4- Calcination

L'hydrate d'alumine ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) récupéré durant la précipitation est ensuite nettoyé et prêt pour la calcination.

Le traitement du produit s'effectue en 6 étapes [4].

- L'hydrate est lavé une première fois pour diminuer la concentration de la soude caustique transportée avec ce dernier.
- L'hydrate lavé est ensuite récupéré par décantation.
- Cet hydrate est ensuite déposé sur des filtres pour être lavé à nouveau dans le but d'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 sec est transporté dans un four rotatif pour y être calciné entre 1000°C et 1200°C pour éliminer l'eau d'hydratation.



- L'alumine est refroidie dans des lits fluidisés. Elle est finalement transportée dans des silos d'entreposage. Les particules d'alumine ont un diamètre de 20 à 200 µm.

2.3- Propriétés physiques de la liqueur Bayer

Les propriétés physiques de la liqueur Bayer comme le point d'ébullition, la chaleur spécifique, la densité ou la viscosité ont été présentés par Perron [4] à partir des travaux de Cousineau [16]. Une attention sera toutefois portée à deux propriétés physiques importantes pour ce projet, la densité et la viscosité.

2.3.1- Définitions

Voici la définition de différents termes employés par la compagnie Alcan dans l'application du procédé Bayer.

- La concentration en NaOH ($[NaOH]$) est exprimée par Alcan en équivalent carbonate (Na_2CO_3). Le facteur de conversion est 1.325 et correspond au rapport de la masse d'une mole de Na_2CO_3 à celle de 2 moles de NaOH.
- Le rapport alumine/caustique (A/C) correspond au ratio massique d'alumine (Al_2O_3) dissout sur le caustique présent dans la liqueur Bayer.
- La causticité est une expression qui se définit comme étant : $\frac{[NaOH]}{[NaOH + Na_2CO_3]}$.

2.3.2- Densité

La densité de la liqueur Bayer dépend de la concentration en NaOH. Le tableau 2.2 présente la densité pour différentes concentrations de NaOH. Pour les concentrations inférieures à 100 g/L, les densités n'ont pas été définies à l'intérieur de l'ouvrage de Cousineau.

Concentration NaOH [g/L]	Densité [kg/m ³]
100	1100
150	1200
250	1300

Tableau 2.2 Densité vs concentration de NaOH

2.3.3- Viscosité

Différents paramètres influencent la viscosité de la liqueur Bayer : la température, la [NaOH], le rapport alumine/caustique (rapport A/C), la causticité et les carbonates organiques. La viscosité dynamique de la liqueur :

- augmente lorsque la [NaOH] et le rapport A/C augmentent pour une température fixée.
- diminue lorsque la température et la causticité augmentent pour une [NaOH] fixée.
- augmente lorsque la concentration en carbonate organique augmente, tous les autres paramètres étant fixés.

Aucune donnée n'est disponible pour des concentrations de NaOH en-dessous de 100 g/L.

Un paramètre prédominant affectant la viscosité est la température. En effet, chaque augmentation de 25 °C diminue la viscosité d'environ la moitié. La figure 2.6 montre la viscosité à une concentration de NaOH de 100 g/L en fonction de la température.

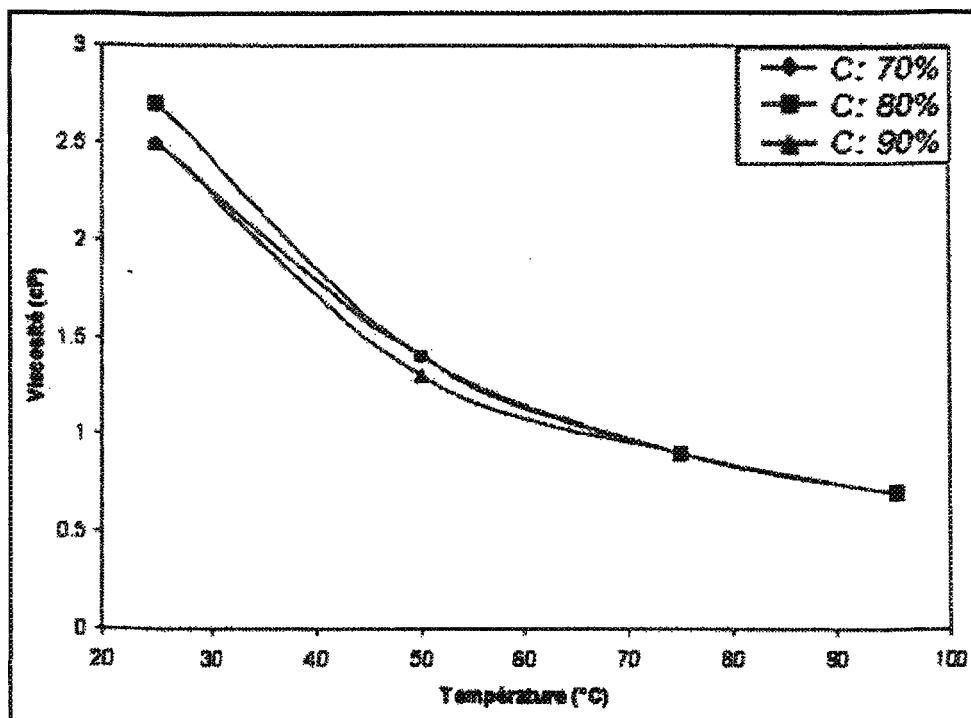


Figure 2.6 Viscosité vs température pour une [NaOH] de 100 g/L et A/C: 0.60 [16]

La figure 2.7 représente la viscosité de la liqueur Bayer à une [NaOH] de 250 g /L en fonction de la température.

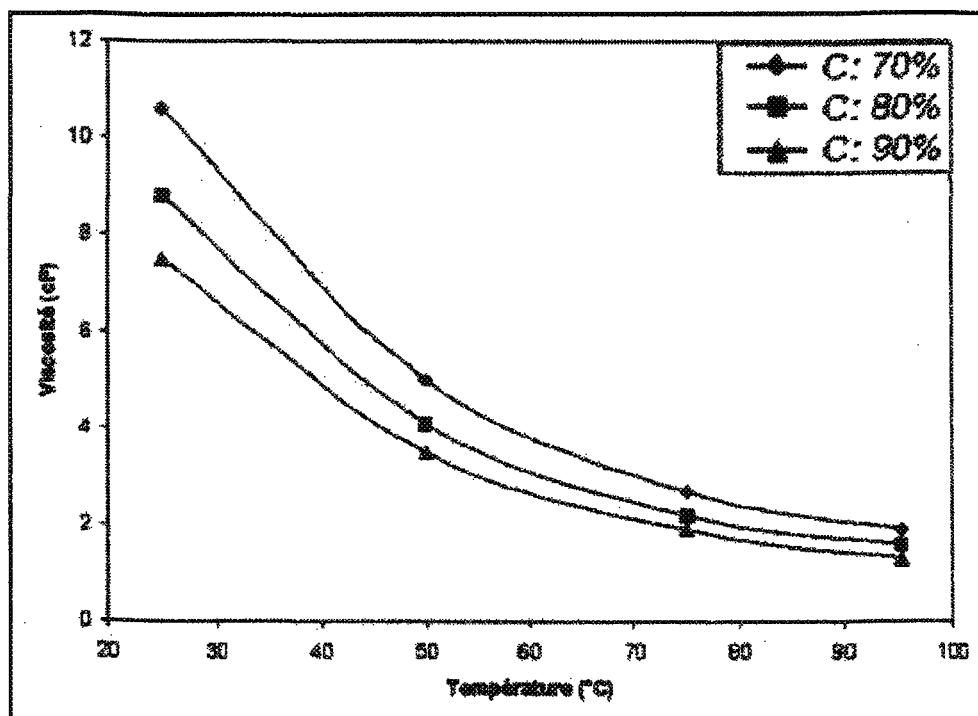


Figure 2.7 Viscosité vs température pour une [NaOH] de 250 g/L et A/C: 0.60 [16]

La concentration de NaOH est également un facteur influençant grandement la viscosité de la liqueur Bayer. La figure 2.8 représente la viscosité de la liqueur Bayer en fonction de sa concentration en NaOH à 50 °C.

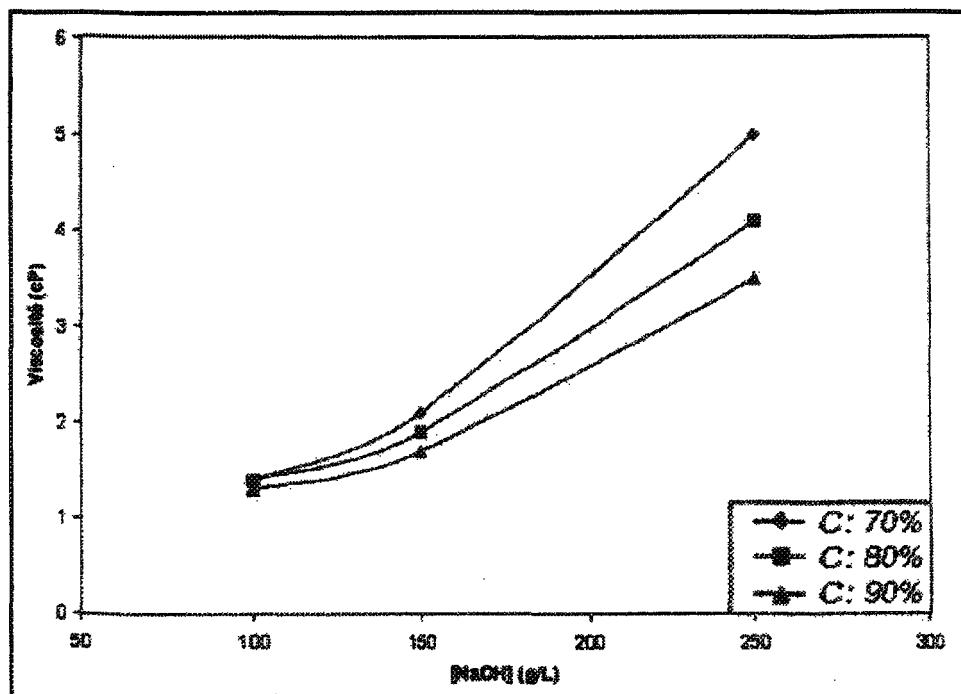


Figure 2.8 Viscosité vs [NaOH] à 50 °C et A/C: 0.60 [16]

2.3.4- Conductivité électrique

La conductivité électrique est un paramètre physique caractérisant l'aptitude pour un matériau (une solution) de permettre le passage du courant électrique, c'est-à-dire de permettre aux porteurs de charges électriques de se déplacer à l'intérieur de ce dernier. Elle influence grandement l'amplitude du courant produit par une pile électrolytique. Elle se

définit comme étant la somme des produits de la charge, de la mobilité et de la concentration de chaque ion :

$$\kappa \equiv \sum_i |z_i| \mu_i c_i \quad (2.1)$$

La valeur de la mobilité des ions est connue pour des solutions diluées. Toutefois, pour les solutions concentrées comme la liqueur Bayer, aucune valeur précise n'est disponible. Cela implique que cette équation doit être utilisée avec une grande prudence dans le cas de la liqueur Bayer. Perron a mesuré expérimentalement la valeur de la conductivité électrique de la liqueur Bayer à l'aide d'un conductivimètre. La figure 2.9 représente la conductivité de la liqueur Bayer en fonction de la température pour différentes concentrations de NaOH.

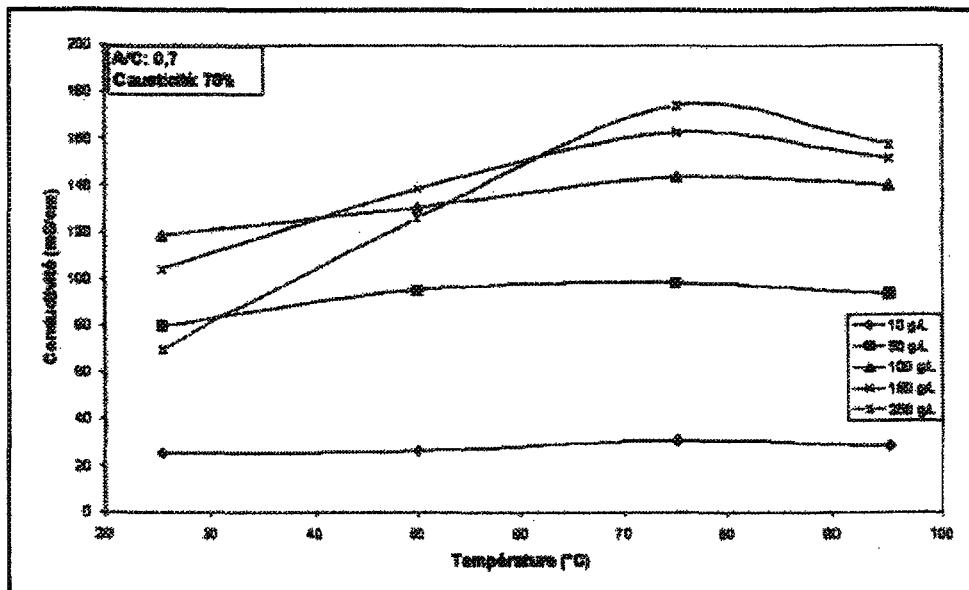


Figure 2.9 Conductivité électrique vs la température

CHAPITRE 3

PRINCIPES D'ÉLECTROCHIMIE

3.1- Introduction

En règle générale, on entend par électrochimie l'étude des phénomènes qui mettent en cause les interactions entre des réactions chimiques et l'électricité. L'électrochimie peut aussi être considérée comme l'étude de la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique et vice versa [17].

En électrochimie, on s'intéresse constamment aux processus et aux facteurs qui influencent le transport de charges à travers l'interface entre deux phases chimiquement distinctes. Généralement, l'une des deux phases de part et d'autre de l'interface étudiée est un électrolyte dans lequel les charges sont transportées par le mouvement des ions (conducteur ionique). La seconde phase peut aussi être un autre électrolyte, mais généralement la seconde phase est une électrode, c'est-à-dire une phase dans laquelle le transport des charges a lieu par le mouvement d'électrons (conducteur électronique).

En 1889, Walther Nernst a proposé une équation indiquant que la différence de potentiel entre deux conducteurs électroniques varie lorsque la concentration de leur environnement respectif diffère des conditions standards [17, 18]. Une pile électrochimique se compose de deux conducteurs électroniques séparés par un conducteur ionique. Si un fil électrique relie les deux conducteurs électroniques, une pile sera créée et un courant électrique circulera si la réaction chimique est spontanée. Cette pile sera dite galvanique. Dans le cas où la réaction n'est pas spontanée, il sera nécessaire de fournir de l'énergie à l'aide d'une source de tension externe dans le but d'engager les réactions d'oxydoréduction. Dans ce cas, la pile est dite électrolytique. La variation de l'énergie libre de Gibbs indique si un processus est spontané à une pression et une température donnée [4].

Les électrons sont les porteurs de charge dans les conducteurs électroniques et les ions sont ceux des conducteurs ioniques. Les réactions d'oxydoréduction engendrent le transfert de charges entre les conducteurs électroniques et ioniques. Par définition, l'interface où a lieu la réaction d'oxydation est appelée l'anode et celle où a lieu la réaction de réduction est la cathode. L'interface entre un conducteur électronique en contact avec un conducteur ionique se nomme électrode, mais ce mot sert aussi à désigner le conducteur électronique lui-même. Ainsi, l'anode et la cathode sont deux électrodes.

3.2- Solution ionique

3.2.1- Principe d'électroneutralité

Un électrolyte est une substance qui, une fois dissoute dans l'eau ou d'autres liquides (solvant), produit des ions libres (anions et cations) et augmente par le fait même la conductivité électrique du liquide. Les forces électriques qui attirent entre eux les anions et les cations dissous sont tellement grandes qu'il est virtuellement impossible de préparer une solution qui contient de façon significative un nombre inégal de charges positives et négatives. Il s'agit du principe d'électroneutralité de l'électrochimie. De façon générale, la relation d'électronégativité s'exprime mathématiquement comme :

$$\sum_i z_i c_i = 0 \quad (3.1)$$

où z_i est le nombre de charge de l'ion i et c_i est sa concentration.

3.2.2- Force ionique

La force ionique (μ) est définie comme étant la moitié de la somme de toutes les concentrations ioniques multipliées par le carré de leur nombre de charges.

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_i z_i^2 c_i \quad (3.2)$$

La force ionique d'une solution est le paramètre le plus important pour déterminer les propriétés des ions qui composent la solution, telles leurs activités ainsi que leurs mobilités. Imaginons une solution où existe un gradient spatial de potentiel. Les cations seront électriquement attirés dans la région où le potentiel est le moins élevé tandis que les anions

le seront dans la région où le potentiel est le plus élevé. Ainsi, la différence de densité de charge (ρ) et la différence potentielle (ϕ) pour deux régions données sont reliées, mais cette relation implique la force ionique du milieu [19] :

$$\rho_{II} - \rho_I \approx -\frac{2F^2}{RT} \mu(\phi_{II} - \phi_I) \quad (3.3)$$

où F est la constante de Faraday et R la constante universelle des gaz.

3.2.3- Concept d'activité chimique

Le concept d'activité est très utile en électrochimie. À chaque espèce chimiquement distincte, une activité peut être attribuée en fonction de son environnement immédiat. L'activité d'une espèce dans un environnement donné représente son aptitude à agir dans les processus thermodynamiques. Plus son activité est grande, plus l'espèce sera « réactive ». L'activité d'un électrolyte en solution dépend, entre autres, de sa concentration. Pour les électrolytes faibles, il est possible d'utiliser directement la concentration ionique comme valeur de l'activité dans les calculs physico-chimiques. Dans un électrolyte fort tel la liqueur Bayer, les interactions entre les ions diminuent l'efficacité thermodynamique de ceux-ci. Pour cette raison, le concept d'activité est employé à la place de la concentration réelle dans les calculs. La valeur de l'activité diffère de celle de la concentration mais l'écart diminue lorsque la dilution augmente [4].

En solution, l'activité a_i et la concentration c_i exprimée en molaire sont reliés par

$$a_i = \gamma_i c_i \quad (3.4)$$

où γ_i est un facteur de correction appelé coefficient d'activité. Ce facteur est généralement inférieur à 1 et est unitaire dans le cas où les solutions sont idéalement diluées.

Le coefficient d'activité est unitaire pour les solides et les liquides purs car les propriétés thermodynamiques molaires de ces substances ne dépendent pas de leur quantité, et presque unitaire pour les solvants. L'activité dans un environnement donné peut aussi être reliée au travail minimum w_i requis pour y déplacer l'espèce à partir d'une région où son activité est unitaire au moyen de la relation suivante :

$$a_i = \exp\left\{\frac{w_i}{k_B T}\right\} \quad (3.5)$$

où k_B est la constante de Boltzmann (1.3807×10^{-23} J K $^{-1}$) et T est la température [19].

Debye et Hückel ont utilisé cette relation, l'équation de Poisson et la relation 3.3 pour calculer le coefficient d'activité d'un ion dans un électrolyte où la force ionique n'est pas trop élevée :

$$-\log(\gamma_i) = \frac{Az_i^2\sqrt{\mu}}{1 + Ba\sqrt{\mu}} \quad (3.6)$$

où A et B sont des constantes (0.5085 et 0.3281 respectivement dans l'eau à 25°C) et a est le diamètre effectif de l'ion.

3.2.4- Solution à force ionique élevée

Dans ce type de solution, la distance inter-ionique est faible et la relation 3.3 est moins valide. Ainsi, les coefficients d'activités ne peuvent plus être calculés avec la relation de *Debye et Hückel* et doivent habituellement être mesurés. Il y a eu plusieurs essais afin d'étendre le domaine de validité de l'équation de *Debye et Hückel* à des forces ioniques élevées mais les succès furent limités. Ces méthodes se basent toutes sur des paramètres empiriques ou sont trop complexes pour être employées. En observant un graphique du coefficient d'activité en fonction de la force ionique pour certaines solutions (HCl, KCl), on remarque que le coefficient d'activité augmente pour les valeurs élevées de la force ionique, contrairement à ce que la théorie de *Debye-Hückel* prédirait [19].

Un phénomène qui apparaît avec les solutions à forte concentration ionique est l'apparition de couplage ionique. Ce phénomène provient de l'intensité des attractions inter-ioniques entre les cations et les anions étant très rapprochés. Ces derniers se lient temporairement et forment une seule entité. Par exemple, une solution aqueuse contenant une forte concentration d'ions de sodium Na^+ et d'ions de sulfate SO_4^{2-} contient également la paire d'ions NaSO_4^- formée par la réaction à l'équilibre :



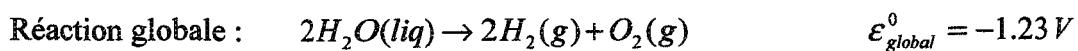
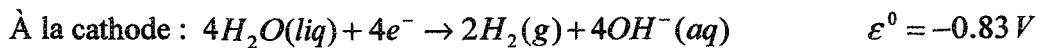
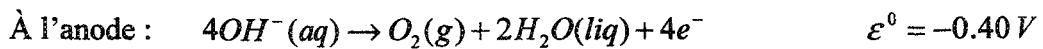
3.3- Électrodes

3.3.1- Potentiel standard d'électrodes

En électrochimie, on s'intéresse souvent qu'à une électrode, la seconde électrode servant seulement à compléter la pile. L'électrode d'intérêt se nomme électrode de travail tandis que la seconde porte le nom d'électrode de référence. À l'intérieur de la pile électrochimique, les réactions d'oxydoréduction peuvent être séparées en deux demi-réactions. Il est possible de connaître la valeur de la force électromotrice (f.e.m.) totale d'une pile mais il est impossible de mesurer la contribution individuelle de chaque électrode au potentiel total. C'est pourquoi un potentiel nul a été attribué par convention à la réduction de l'ion d'hydrogène en solution dans les conditions spécifiées. La différence de potentiel aux bornes d'une pile électrochimique peut alors être interprétée comme une différence entre le potentiel de l'électrode de travail et l'électrode de référence. Lorsque l'électrode de référence est l'électrode à hydrogène, la différence de potentiel de la pile correspond alors au potentiel de l'électrode de travail. Quand les conditions spécifiques sont satisfaites, ce potentiel s'appelle tension d'électrode standard. Il existe des tables de potentiel standard d'électrodes. Généralement, les réactions d'électrode sont écrites dans le sens de la réduction.

Ces potentiels standards d'électrode peuvent être utilisés pour calculer la différence de potentiel standard d'une pile. Effectuons ce calcul dans le cas de l'électrolyse de l'eau en milieu basique :

L'électrolyse de l'eau produit de l'oxygène à l'anode et de l'hydrogène à la cathode.



L'électrolyse de l'eau en milieu basique n'est pas un phénomène spontané car le potentiel standard de la réaction globale est négatif.

3.3.2- Équation de Nernst

L'équation de Nernst, nommée d'après les travaux du chimiste Allemand Walther Nernst, peut être obtenue à partir de l'équation thermodynamique faisant le lien entre la variation de l'énergie libre de Gibbs et l'influence des concentrations des espèces participant à une réaction chimique :

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \left\{ \frac{a_M^m \cdot a_N^n \cdots}{a_A^a \cdot a_B^b \cdots} \right\} \quad (3.8)$$

où $a_M, a_N, \dots, a_A, a_B, \dots$ sont l'activité de chaque espèce.

Certaines espèces prenant part à la réaction à l'électrode sont des solides ou des liquides purs. Pour ces substances pures, l'activité est constante et sa valeur est considérée comme unitaire. L'activité des gaz est habituellement prise comme étant la pression partielle de ces derniers exprimée en atmosphère et l'activité des ions en solution diluée est généralement considérée comme étant leur concentration molaire.

En substituant dans l'équation 3.8 les relations $\Delta G = -nF\Delta E_n$, $\Delta G^0 = -nF\Delta E^0$ et en divisant chaque membre de l'équation par $-nF$, nous obtenons l'équation de Nernst pour une réaction à l'électrode :

$$\Delta E_n = \Delta E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left\{ \frac{a_M^m \cdot a_N^n \cdots}{a_A^a \cdot a_B^b \cdots} \right\} \quad (3.9)$$

L'équation de Nernst permet d'exprimer la relation qui existe entre le potentiel d'une pile électrochimique et les concentrations de ses constituants à l'équilibre. Dans le cas spécifique d'une pile électrochimique, il est possible de réarranger l'équation 3.9 :

$$\Delta E_{n \text{ pile électrochimique}} = (E_{Cathode}^0 - E_{Anode}^0) - \frac{RT}{nF} \ln \left\{ \frac{a_M^m \cdot a_N^n \cdots}{a_A^a \cdot a_B^b \cdots} \right\} \quad (3.10)$$

3.4- Réactions à l'électrode

3.4.1- Réactions chimiques hétérogènes

Par définition, une électrode est strictement définie par l'interface séparant un conducteur électronique d'un conducteur ionique. Toutefois, le mot électrode est souvent employé en référence avec le conducteur électronique lui-même. Une réaction se produisant seulement sur une surface se nomme une réaction hétérogène. Ainsi, les réactions électrochimiques sont des réactions hétérogènes. Ce type de réaction se produit en plusieurs étapes. Elles débutent avec le transport des réactifs du corps de la solution jusqu'à l'électrode. Par la suite a lieu la réaction d'oxydoréduction. Cette dernière génère

des produits et ces derniers doivent être éloignés du site réactionnel. Dans ce type de réaction hétérogène, la vitesse du processus est limitée par l'étape la plus lente. Dans le cas où la réaction d'oxydoréduction est très rapide, le processus sera gouverné par la vitesse de transport des réactifs et des produits. Ce type de réaction électrochimique est contrôlé par le transfert de masse et obéit aux lois hydrodynamiques.

3.4.2- Lois de Faraday

Soit une paire d'électrodes reliées entre elles par un fil électrique immergé dans un électrolyte. Si la pile électrochimique ainsi formée est galvanique, un courant électrique apparaît. Si la pile électrochimique est électrolytique, une tension électrique suffisante doit être appliquée entre les électrodes pour qu'un courant électrique apparaisse. Dans ces deux cas, la présence de ce courant électrique est associée à des réactions d'oxydation et de réduction qui ont lieu à l'anode et à la cathode.

En 1832, Michael Faraday a énoncé la loi de l'électrolyse : la quantité de matière (m) produite ou consommée à chaque électrode est proportionnelle à la quantité d'électricité traversant la cellule électrochimique.

$$m = k \int_0^t I dt \quad (3.11)$$

où k est une constante de proportionnalité et I le courant instantané qui circule dans la pile.

La seconde loi de Faraday stipule que les masses des différentes substances produites ou consommées en fonction d'une même quantité d'électricité sont proportionnelles à leur poids chimiques respectifs.

Les lois de Faraday sont des lois expérimentales qui se sont toujours avérées rigoureusement exactes. Dans une cellule où circule un courant continu, ce courant est majoritairement relié aux réactions chimiques et une partie minime peut servir à d'autres fins. La fraction reliée aux réactions chimiques se nomme courant faradique tandis que l'autre partie se nomme courant non-faradique.

3.4.3- Polarisation

À la section 3.3.2, le potentiel en circuit ouvert d'une pile électrochimique (et de la réaction complète ΔE_n) a été discuté. Ce potentiel est régi par les lois de la thermodynamique. Soit l'électrolyse de l'eau à titre d'exemple. La tension standard de la réaction a été évaluée à -1.23V. Toutefois, en appliquant une source de tension continue et inférieure à la tension standard à une paire d'électrodes immergées dans l'eau, le courant demeurera nul. En réalité, un courant sera initialement généré mais s'estompera rapidement car l'apparition d'oxygène à l'anode et d'hydrogène à la cathode produiront une force contre-électromotrice et tant que ce potentiel est égal à la tension appliquée, aucun courant ne pourra passer. La tension appliquée doit être supérieure à la différence des tensions standards des électrodes avant de voir apparaître un courant. La différence entre la

tension appliquée et le potentiel en circuit ouvert afin d'engendrer un courant se nomme polarisation.

La polarisation se divise en trois formes distinctes :

- la polarisation ohmique
- la polarisation d'activation
- la polarisation de concentration.

Ainsi, à chaque électrode, le surplus de potentiel requis par chaque type de polarisation se nomme surtension et est représenté par η :

$$E = E_n + \eta_{ohm} + \eta_{act} + \eta_{conc} \quad (3.12)$$

3.4.3.1- Polarisation ohmique

Pour qu'il y ait un courant, les ions doivent se déplacer au travers le conducteur ionique. Un champ électrique est nécessaire pour maintenir le mouvement des ions et ce champ est généré grâce au gradient de potentiel qui traverse la cellule électrochimique. Ce gradient de potentiel correspond à la polarisation ohmique. La grandeur de la polarisation ohmique est trouvée grâce à la loi d'Ohm appliquée au travers la cellule électrochimique.

$$\eta_{ohm} = I R_{Sol} \quad (3.13)$$

où R_{Sol} est la résistance de la solution entre les deux électrodes

La résistance peut se calculer à l'aide d'intégrales pour des géométries idéales, par exemple, un prisme rectangulaire où une sphère. Toutefois, pour des géométries plus complexes, la mesure de cette résistance devient la seule solution envisageable.

3.4.3.2- Polarisation d'activation

Certaines réactions aux électrodes, comme certaines réactions chimiques, sont lentes. Cette lenteur est associée à une barrière énergétique appelée énergie d'activation. Pour les réactions chimiques, cette barrière peut être franchie plus facilement en augmentant la température. Le même phénomène est vrai pour les réactions aux électrodes, mais pour ces dernières une augmentation du potentiel électrique peut aussi aider à franchir cette barrière énergétique. Ainsi, la vitesse d'une réaction chimique dépend de l'énergie dont disposent les réactifs et de la valeur de la barrière de potentiel associée au mécanisme réactionnel particulier. Le flot de courant traversant la cellule électrochimique est engendré par la polarisation d'activation η_{act} . Le courant augmente lorsque la température de la pile augmente de même que lorsque la tension externe appliquée aux électrodes augmente. L'accroissement de ces paramètres augmente donc la vitesse des réactions électrochimiques. L'équation fondamentale de la polarisation d'activation décrit ce phénomène [19] :

$$i = i_n \left[\exp\left\{(1-\alpha)\frac{nF}{RT}\eta_{act}\right\} - \exp\left\{-\alpha\frac{nF}{RT}\eta_{act}\right\} \right] \quad (3.14)$$

où α est une constante et i_n est une quantité connue sous le nom « densité de courant d'échange ». Elle représente la densité de courant « échangé » dans les deux sens entre le

conducteur ionique et le conducteur électronique lorsque la cellule électrochimique est à l'équilibre, le courant net à travers l'interface étant nul.

À la figure 3.1, le trait en gras représente l'équation 3.14 en fonction du potentiel appliqué aux électrodes. Les deux autres courbes représentent les courants d'oxydation (3.15) et de réduction (3.16). La somme de ces courants résulte en l'équation 3.14.

$$i_{ox} = i_n \exp\left\{ (1-\alpha) \frac{nF}{RT} \eta_{act} \right\} \quad 3.15$$

$$i_{rd} = -i_n \exp\left\{ -\alpha \frac{nF}{RT} \eta_{act} \right\} \quad 3.16$$

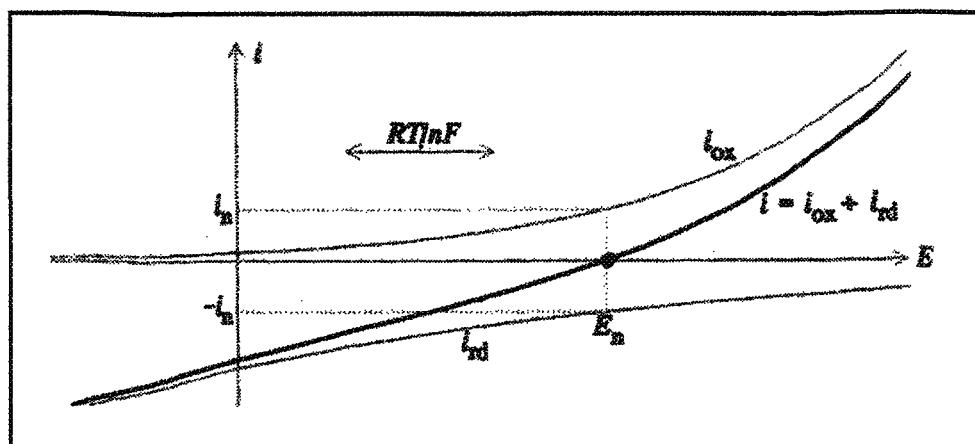


Figure 3.1 Graphe du courant vs potentiel

En résumé, le courant total au siège d'une électrode est la somme du courant positif d'oxydation i_{ox} et du courant négatif de réduction i_{rd} . Puisqu'il y a deux électrodes participantes aux réactions, les réactions d'oxydoréduction se produiront simultanément aux deux électrodes. Dans le cas où le potentiel appliqué aux bornes des électrodes est

élevé, par exemple 6 volts dans le cas de l'électrolyse de l'eau, alors une seule réaction prédominera à chaque électrode. La réaction d'oxydation aura lieu à l'anode et celle de réduction se produira à la cathode.

À l'exception du cas où $\alpha = \frac{1}{2}$, il est impossible d'inverser l'équation 3.14, c'est-à-dire qu'il est impossible d'obtenir une relation explicite pour η_{act} en fonction du courant i . Lorsque $\alpha = \frac{1}{2}$, il devient possible d'inverser l'équation[19] :

$$\eta_{act} = 2 \frac{RT}{nF} \ln \left\{ \frac{i}{2i_n} + \sqrt{1 + \frac{i^2}{4i_n^2}} \right\} \quad (3.17)$$

3.4.3.3- Polarisation de concentration

Lorsqu'une réaction d'oxydation ou de réduction se produit à l'électrode, le réactif est consommé à la surface de l'électrode et doit être remplacé par de nouveaux réactifs en provenance du corps de la solution. À moins que ce remplacement soit complet et immédiat, un gradient de concentration se crée entre la surface de l'électrode et le corps de la solution :

$$c_R^{Electrode} < c_R^{Solution}$$

Il en va de même pour les produits de la réaction, mais dans ce cas, le gradient de concentration est inversé :

$$c_P^{Electrode} > c_P^{Solution}$$

La grandeur du gradient de concentration dépend de la nature et de l'efficacité des mécanismes de transport des réactifs et des produits entre le siège de la réaction et le corps de la solution. Les mécanismes de transport seront le sujet du prochain chapitre.

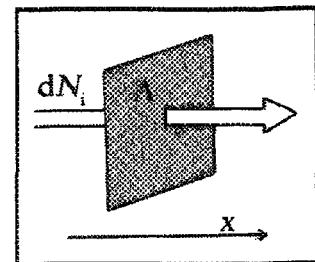
CHAPITRE 4

TRANSPORT EN SOLUTION

Au chapitre précédent, nous avons abordé la question de la polarisation de concentration. Il faut rappeler que lors de la réaction d'oxydoréduction à l'électrode, un gradient de concentration se crée pour les réactifs et les produits entre l'électrode et le corps de la solution. Différents mécanismes permettent le transport des substances entre ces deux milieux. Le présent chapitre décrit ces modes de transport.

4.1- Flux

La densité du flux j_i [$\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] est une mesure de la quantité d'une espèce en solution traversant une unité de surface par unité de temps.



$$\vec{j}_i = \frac{1}{A} \frac{dN_i}{dt} \vec{e}_A \quad (4.1)$$

où \vec{e}_A est le vecteur unitaire normal à la surface.

Le flux total J_i [mol/s] est une mesure du taux à lequel une espèce en solution traverse une surface donnée.

$$\vec{J}_i = \frac{dN_i}{dt} \vec{e}_A = A \vec{j}_i \quad (4.2)$$

En un point donné, la densité du flux peut être écrite comme étant :

$$\vec{j}_i = \bar{v}_i c_i \quad (4.3)$$

où c_i est la concentration locale de l'espèce en solution et \bar{v}_i est sa vitesse moyenne dans la direction du transport.

Il est également possible d'écrire la loi de la conservation de la masse, en fonction du transport, pour un référentiel cartésien :

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{j}_i \quad (4.4)$$

4.2- Mécanismes de transport

Les trois différents mécanismes de transport par lesquels une espèce en solution peut se déplacer à l'intérieur de la solution sont la migration, la diffusion et la convection.

Chacun de ces mécanismes se rapporte à un gradient particulier [19] :

Mécanisme de transport	Se produit en réponse à :
Migration	Un gradient de champ électrique
Diffusion	Un gradient d'activité ou de concentration
Convection	Un gradient de pression

4.2.1- Migration

Lorsqu'un champ électrique est présent, le transfert de masse par migration peut avoir lieu. Le transport se fait suivant la direction du champ.

La vitesse moyenne d'un ion de charge z_i et de mobilité u_i est donnée par [19] :

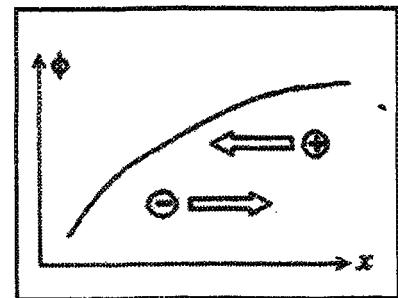
$$\vec{v}_i = \frac{z_i}{|z_i|} u_i \vec{E} = -\frac{z_i}{|z_i|} u_i \nabla \phi \quad (4.5)$$

où $\nabla \phi$ est le gradient de potentiel électrique.

On peut finalement exprimer la densité de flux migratoire à l'aide de l'équation 4.3 :

$$\vec{j}_i^{mig} = \vec{v}_i c_i = -\frac{z_i}{|z_i|} u_i c_i \nabla \phi \quad (4.6)$$

Ainsi, en accord avec (4.6), il est possible de conclure que les anions se déplacent vers la région où le potentiel est le plus élevé tandis que les cations se déplacent vers celle où il est le plus faible.



4.2.2- Diffusion

Adolf Fick a établi les lois sur la diffusion dans les liquides vers 1855. Ainsi, la première loi de Fick énonce que le flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration. Cette loi est dérivée des hypothèses établies par Joseph Fourier en 1822 (loi de Fourier) sur la conduction de la chaleur.

La première loi de Fick relie la densité de flux et le gradient de concentration :

$$\vec{j}_i^{\text{diff}} = -D_i \nabla c_i \quad (4.7)$$

où D_i est le coefficient de diffusion de l'espèce i dans un milieu donné. Il dépend de la température. Ainsi, la diffusion augmente lorsque l'écart de concentration augmente ou que la distance de diffusion diminue.

La seconde loi de Fick, qui s'appelle aussi équation de continuité, est obtenue en utilisant la première loi et en appliquant la loi de la conservation des espèces (la variation de la quantité d'espèces dans un volume est égal au bilan des flux entrant et sortant) d'où [4, 20] :

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 c_i \quad (4.8)$$

4.2.3- Convection

Le phénomène de convection est généralement causé par un gradient de pression. Il s'agit d'un moyen de transport macroscopique dans lequel les espèces en solution sont

entraînées par l'effet du mouvement hydrodynamique du fluide. Lorsque la vitesse de l'écoulement devient grande, l'apport de la convection au transfert de masse devient très important par rapport à la migration et la diffusion. L'équation 4.3 peut représenter la convection puisque le gradient de pression est alors responsable de la vitesse v .

4.2.4- Transport net

La densité totale du flux d'une espèce chimique est l'addition du flux relatif à chaque mécanisme de transport. Ainsi, le flux total incluant dans l'ordre les termes de diffusion, migration et convection est [4] :

$$\vec{J}_i = -D_i \nabla c_i - \frac{z_i F}{RT} D_i c_i \nabla \phi + c_i \vec{v} \quad (4.9)$$

Dans le présent projet, les espèces chimiques se déploient dans la liqueur Bayer. La liqueur Bayer est une solution à force ionique très élevée pour laquelle le terme de migration ionique peut être considéré comme négligeable. En substituant l'équation du flux total (4.9) dans l'équation de conservation (4.4) et en négligeant le terme de migration, l'équation générale de transport devient:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 c_i - \vec{v} \nabla c_i \quad (4.10)$$

où D_i est considéré invariant selon les trois axes.

4.3- Concept de la couche de diffusion de Nernst

En 1904, Nernst a introduit le concept de couche de diffusion. Lorsqu'une électrode est polarisée, la concentration des espèces chimiques à la surface de cette dernière est différente de celle du corps de la solution. On considère que la concentration des espèces chimiques demeure constante et égale à la concentration présente dans le corps de la solution jusqu'à une distance δ de l'électrode grâce à la convection. À partir de ce point et jusqu'à la surface de l'électrode, on considère qu'aucun mouvement de convection n'est présent. Ainsi, la totalité du transfert de masse s'effectue alors par diffusion. L'épaisseur de cette couche, notée δ , dépend de la nature de la solution. Elle peut varier entre 10^{-2} cm et 10^{-4} cm [4]. Tel qu'illustré à la figure 4.1, le profil de concentration est approximativement linéaire à l'intérieur de la couche statique de diffusion. Il est proportionnel au gradient de concentration entre le corps de la solution et la surface de l'électrode. La première loi de Fick sur la diffusion donne l'expression de la densité du flux de matière :

$$j = D \frac{(c^{corps} - c^{elect})}{\delta} \quad (4.11)$$

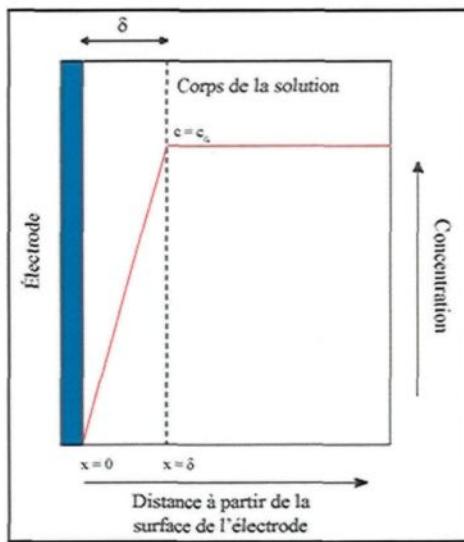


Figure 4.1 Couche de diffusion de Nernst

Le modèle de Nernst ne fait pas le lien entre l'épaisseur de la couche de diffusion δ et la vitesse de l'écoulement v . Pourtant, la vitesse de l'écoulement a un effet sur l'épaisseur de cette couche. Des expérimentations ont démontré qu'il existait une relation entre ces deux paramètres [4] :

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{v}} \quad (4.12)$$

Expérimentalement, on a prouvé la présence d'une couche mince près de la surface de l'électrode où la concentration varie rapidement. Toutefois, des mouvements de fluide ont été observés à une distance de l'ordre de 10^{-5} cm de la paroi. Puisque le modèle de Nernst prévoit une couche de diffusion statique près de l'électrode, il devient nécessaire de modifier le modèle.

4.4- Théorie de la couche mince

La théorie de la couche mince [4] a été développée par Langmuir [20, 21]. Le modèle de la couche mince est semblable à celui de Nernst en ce sens qu'il comporte une couche mince présente entre le corps de l'écoulement et la paroi. Toutefois, les caractéristiques de la couche mince diffèrent de celles du corps de la solution. Dans le cas d'une interface gaz liquide, il y aura la formation de deux couches minces : une au niveau du gaz et une au niveau du liquide. La théorie suppose qu'aucun mouvement relatif n'est présent entre les couches minces. De plus, elle suppose que les substances contenues à l'intérieur de ces couches minces se déplacent uniquement en régime laminaire et de façon tangentielle à la paroi. Puisque le transfert de masse s'effectue perpendiculairement à la surface, cela signifie qu'aucun transfert de masse ne provient de l'écoulement à l'intérieur de la couche mince. Pour ce qui est du cas d'une interface solide liquide, la couche mince demeure immobile.

D'autres études effectuées après le développement de cette théorie ont démontré qu'il était impossible qu'un écoulement tangentiel à la paroi n'ait pas de contribution dans le transfert de masse à l'interface solide liquide [4, 20]. Ainsi, un mouvement est toujours accompagné de fluctuations normales à son axe de déplacement. Il en résulte alors nécessairement un transfert de quantité de mouvement ou de matière perpendiculaire à l'écoulement. D'autres expériences ont également démontré que les turbulences étaient présentes à l'intérieur de la couche limite. Elles sont situées à l'intérieur d'une zone de la couche limite où la turbulence domine sur la viscosité [4]. La couche limite turbulente peut

être divisée en trois régions. Celle voisine à la paroi est appelée « sous-couche visqueuse » et est régie par la viscosité. La région située à l'autre extrémité de la couche limite se nomme « région externe » et la turbulence est développée à l'intérieur de cette zone. Finalement, la zone comprise entre ces deux régions se nomme « région logarithmique ». Cette zone est un lieu de transition entre les deux autres zones. Le profil de vitesse est différent entre chaque zone. La figure 4.2 présente ce dernier :

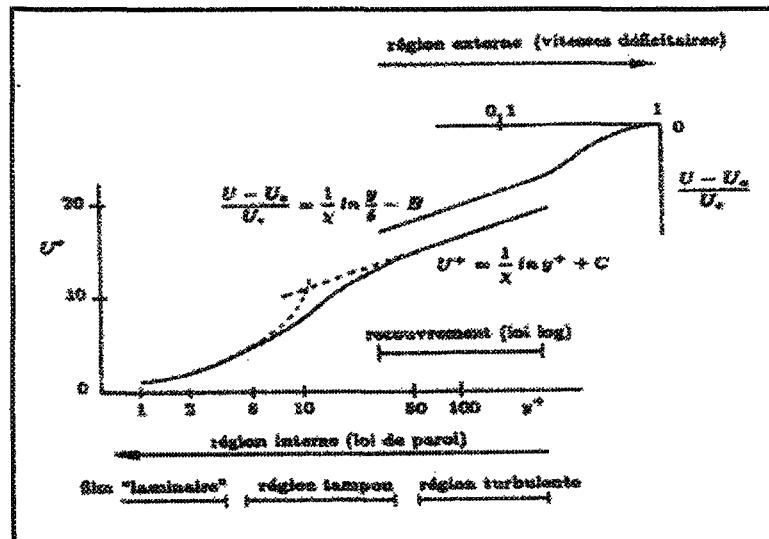


Figure 4.2 Couche limite hydrodynamique [4]

CHAPITRE 5

COMPORTEMENT D'UN ÉCOULEMENT EN PRÉSENCE D'UN OBSTACLE

5.1- Écoulement autour d'un corps immergé

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, des modèles de sonde seront immergées à l'intérieur d'un écoulement. Dans cette situation, les sondes sont complètement entourées par le fluide et l'écoulement autour de ces derniers est qualifié « d'écoulement externe ». Pour ce type de problème, deux approches (théorique et expérimentale) peuvent être employées pour décrire le comportement du fluide autour des objets. Toutefois, les équations régissant l'écoulement et le niveau de complexité des formes géométriques (sonde) impliquées dans le problème rendent les calculs purement théoriques ardu. La modélisation informatique de même que les expérimentations sont généralement privilégiées pour ce type de problématique. Ce chapitre se veut donc un outil dans le but de qualifier le comportement général de l'écoulement autour de certaines configurations

d'objets et non un moyen de calculer exactement les profils d'écoulement autour des sondes.

5.1.1- Caractéristiques générales des écoulements ouverts

Un corps immergé à l'intérieur d'un fluide en mouvement subit des contraintes dues aux interactions présentes entre l'objet et le fluide. Ces dernières peuvent être décrites en termes de contraintes de cisaillement τ_w , causées par les effets visqueux, et les contraintes normales p , causées par la pression. La figure 5.1 présente ces deux types de contraintes dans le cas d'un profil aérodynamique.

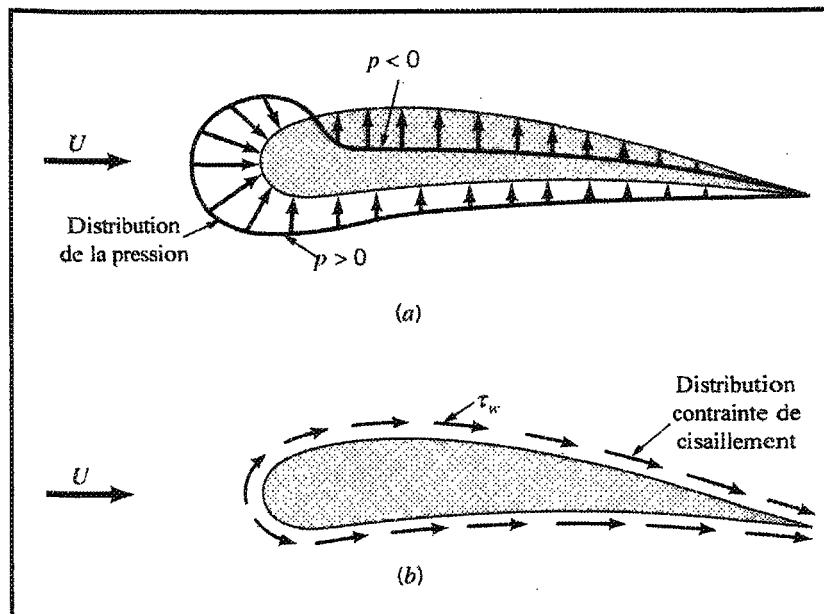


Figure 5.1 Contraintes normales p (a) et contraintes de cisaillement τ_w (b)

Les contraintes de cisaillement et les contraintes normales varient en grandeur et en direction autour de la surface de l'objet. Il est généralement difficile d'obtenir le profil détaillé de ces contraintes. L'effet résultant de ces contraintes peut être donné comme étant

la somme d'une force de traînée \mathcal{D} présente dans le sens de l'écoulement et d'une force de montée \mathcal{L} normale à l'écoulement.

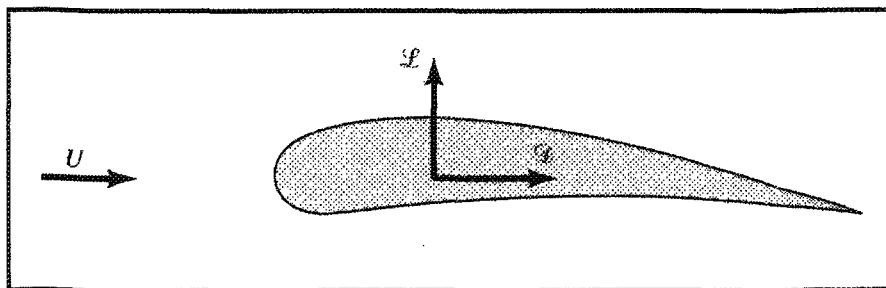


Figure 5.2 Force de trainée \mathcal{D} et de montée \mathcal{L}

5.1.2- Caractéristiques d'un écoulement contournant un objet

Les écoulements ouverts contournant un objet sont régis par une variété de phénomènes se rattachant à la mécanique des fluides. Les caractéristiques de la distribution du champ de vitesse autour de l'objet sont fonction de sa forme. Ainsi, les objets ayant des formes simples ont généralement des champs de vitesse plus simples que les objets possédant une forme complexe.

Pour un objet d'une forme donnée, les caractéristiques de l'écoulement dépendent fortement de différents paramètres tels la taille, l'orientation, la vitesse et les propriétés du fluide. Pour les écoulements ouverts, le paramètre adimensionnel le plus important est le nombre de Reynolds [22].

$$\text{Re} = \frac{\rho U \ell}{\mu_d} = \frac{U \ell}{\nu} \quad (5.1)$$

où ρ est la densité, U est la vitesse du fluide, ℓ est la longueur caractéristique, μ_d est la viscosité dynamique et ν est la viscosité cinématique.

Le nombre de Reynolds a été nommé en l'honneur de Osborne Reynolds qui fut le premier à démontrer que la combinaison de différentes variables pouvait être utilisée à titre de critère dans le but de faire la distinction entre un écoulement laminaire ou turbulent. Le nombre de Reynolds constitue une mesure du ratio entre les forces d'inertie sur un élément de fluide et les forces visqueuses sur cet élément. Un nombre de Reynolds très petit ($\text{Re} \ll 1$) constitue une indication que les forces visqueuses sont dominantes et il devient possible de négliger les forces d'inertie. La densité du fluide devient donc négligeable à l'intérieur de ce type de problèmes. À l'inverse, lorsque le nombre de Reynolds est très élevé, il devient possible de négliger l'effet des forces visqueuses.

Les principales différences entre un écoulement comportant un grand ou un petit nombre de Reynolds peuvent être illustrées à l'aide de deux cas : une tige plate parallèle à l'écoulement et un cylindre. Pour ces deux cas, l'écoulement sera considéré pour un nombre de Reynolds de 0.1, 10 et 10^7 . La figure 5.3 présente le cas de la tige mince :

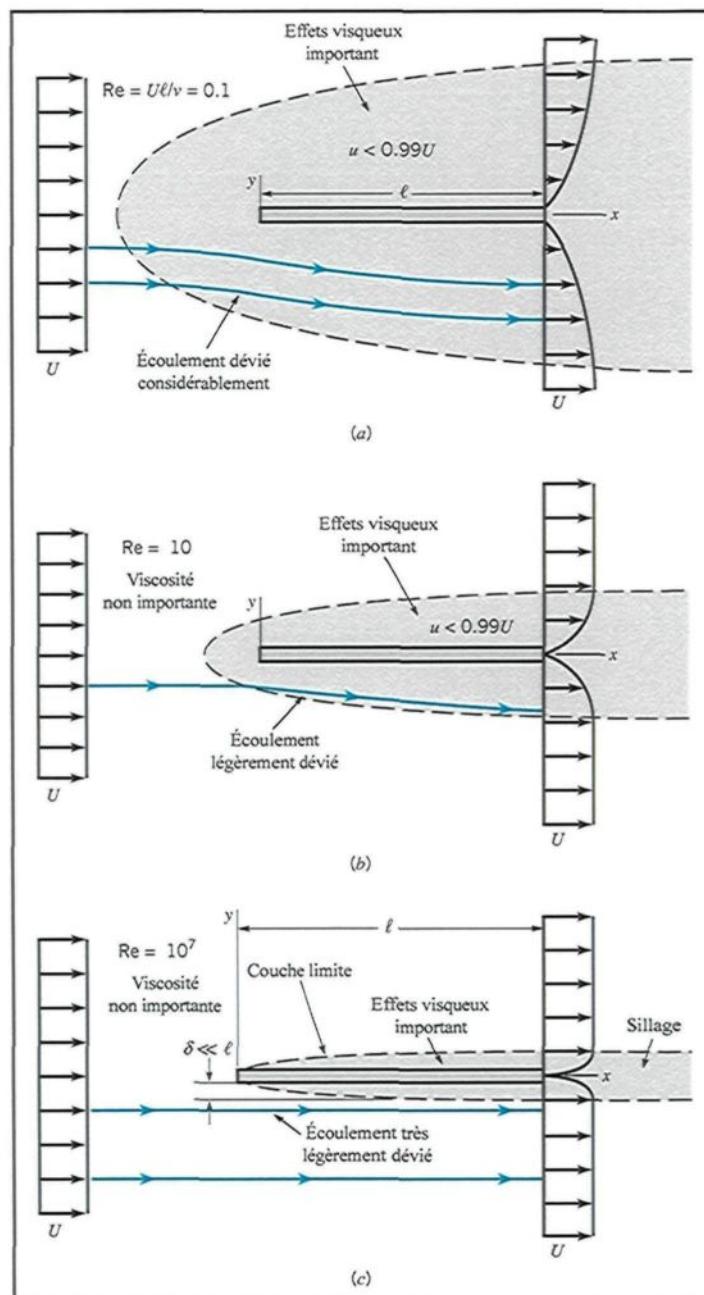


Figure 5.3 Caractéristiques d'un écoulement autour d'une tige mince pour: (a) un petit nombre de Reynolds, (b) un nombre de Reynolds moyen et (c) un nombre de Reynolds élevé [22]

Il est possible de constater que lorsque le nombre de Reynolds est faible, les effets visqueux sont relativement forts. Ainsi, l'uniformité de l'écoulement est passablement modifiée bien en amont de la tige de même que tout autour de cette dernière et en aval. Pour atteindre la portion de l'écoulement où la vitesse est différente de moins de 1% de sa valeur originale, il est nécessaire de se rendre relativement loin de la plaque. Ainsi, lorsque le nombre de Reynolds est faible, l'écoulement est altéré sur une grande distance autour de l'objet.

Lorsque le nombre de Reynolds augmente, la région où les effets visqueux sont importants diminue dans chaque direction sauf en aval de la pièce. La figure 5.3b. décrit ce cas. Il est possible de constater que les lignes de fluides sont déviées, mais beaucoup plus faiblement que dans le cas où le nombre de Reynolds est faible.

Lorsque le nombre de Reynolds est élevé, l'écoulement est dominé par les forces inertielles et les effets visqueux sont négligeables à l'exception d'une mince zone située au pourtour de l'objet de même qu'à l'intérieur du sillage présent à l'arrière de ce dernier. Une couche limite est présente autour de l'objet. Son épaisseur est beaucoup plus faible que la dimension de l'objet même. À l'intérieur de cette couche limite, la vitesse de déplacement du fluide passe de la vitesse établie $u = U$ à une vitesse nulle à la surface de l'objet. L'écoulement à l'intérieur de la couche limite peut être laminaire ou turbulent selon les paramètres du problème.

En 1904, Ludwig Prandtl [22] a exprimé le concept de la couche limite. Il l'a décrite comme une fine région à la surface d'un objet à l'intérieur duquel les effets visqueux sont très importants et à l'extérieur duquel le fluide se comporte comme s'il était essentiellement non visqueux. Il est utile de noter que la viscosité du fluide est la même partout : il y a seulement l'importance relative de la viscosité entre l'intérieur et l'extérieur de la couche limite due au gradient de vitesse qui diffère.

5.1.3- Écoulement autour d'un cylindre (sphère)

Le comportement d'un écoulement contournant un objet arrondi varie également en fonction du nombre de Reynolds. En règle générale, plus le nombre de Reynolds est grand, plus petite est la région de l'écoulement où les effets visqueux sont importants. Avec les objets qui ne sont pas suffisamment aérodynamique, un autre phénomène apparaît : il y a séparation de l'écoulement. La figure 5.4b. illustre ce phénomène.

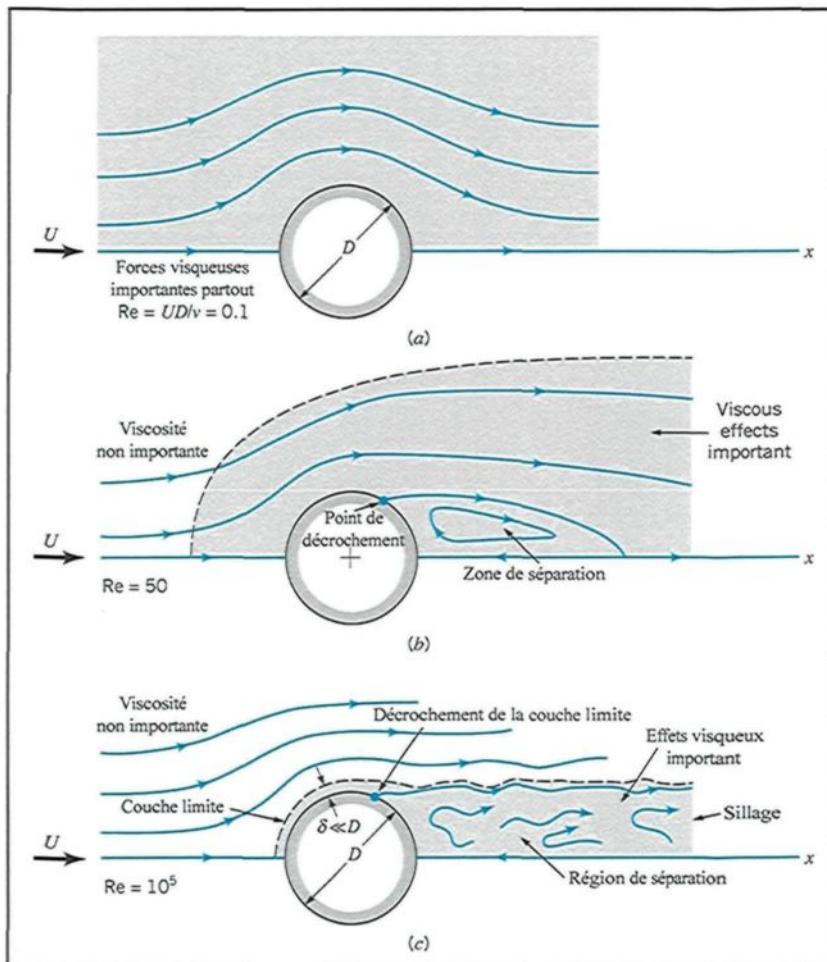


Figure 5.4 Caractéristiques d'un écoulement autour d'un cylindre pour: (a) un petit nombre de Reynolds, (b) un nombre de Reynolds moyen et (c) un nombre de Reynolds élevé. [22]

Dans le cas d'un très faible nombre de Reynolds, les caractéristiques de l'écoulement sont semblables à l'avant et à l'arrière de l'objet. Toutefois, lorsque le nombre de Reynolds gagne en importance, l'inertie devient plus significative et à un certain point de l'objet, un décrochement de la couche limite survient. En effet, l'inertie du fluide

devient suffisamment élevée pour qu'en ce point, le liquide soit incapable de suivre le contour de l'objet. Ce décrochement provoque l'apparition d'une zone de séparation à l'arrière de l'objet où une partie du fluide circule à l'opposé du sens de l'écoulement.

Lorsque le nombre de Reynolds est encore plus élevé, la région affectée par les forces visqueuses s'étend en aval. Ce sillage est irrégulier, instable voir même turbulent. De plus, l'épaisseur de la couche limite à l'avant est mince ($\delta \ll D$). Le fluide à l'extérieur de cette couche limite agit comme s'il était non visqueux. L'importance relative des forces visqueuses dépend de la région de l'écoulement qui est considéré. Les gradients de vitesse à l'intérieur de la couche limite et dans le sillage sont plus élevés que le gradient de vitesse présent ailleurs dans le fluide. Puisque les contraintes de cisaillement, c'est-à-dire les forces visqueuses sont fonction de la viscosité du fluide et du gradient de vitesse présent, il en résulte que les effets visqueux sont confinés à la couche limite et au sillage.

5.2- Écoulement visqueux en conduit

Comme il a été mentionné précédemment, l'appareil de mesure qui sera développé dans ce projet sera immergé à l'intérieur du fluide. Le liquide entourera ainsi complètement l'objet. Il est toutefois pertinent pour ce projet de connaître les principes régissant le comportement d'un fluide à l'intérieur d'une conduite.

5.2.1- Principes généraux

Dans le cas de conduites, deux types d'écoulements peuvent être en cause : les écoulements en conduite pleine (figure 5.5a.) et les écoulements en canal ouvert (figure 5.5b.). La différence entre ces deux types d'écoulement provient des mécanismes régissant le mouvement. Pour le canal ouvert, c'est uniquement la gravité qui entraîne le mouvement. Dans le cas des écoulements en conduite pleine, la gravité peut avoir une influence mais c'est surtout le gradient de pression au travers du tuyau qui induit le mouvement.

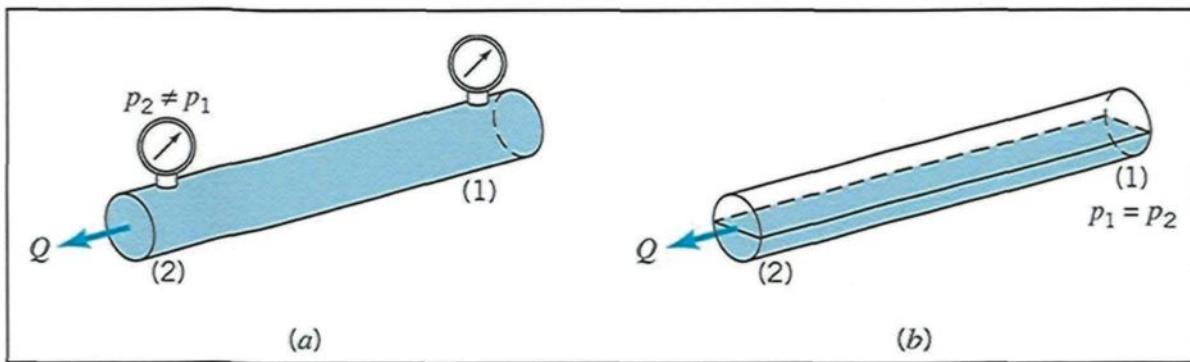


Figure 5.5 (a) Écoulement en conduite pleine. (b) Écoulement en canal ouvert

5.2.1.1- Comportement de l'écoulement

L'écoulement à l'intérieur de la conduite peut être laminaire ou turbulent. Osborne Reynolds fut le premier à décrire le phénomène et illustra le problème en trois cas (figure 5.6).

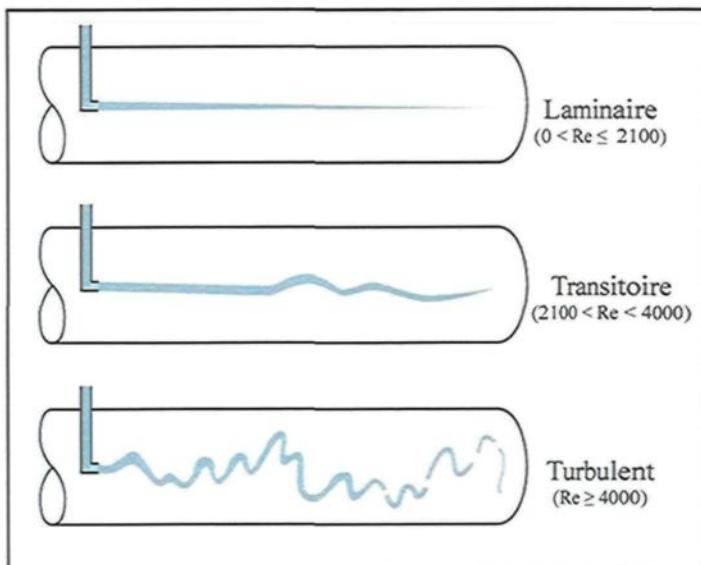


Figure 5.6 Type d'écoulement

Une conduite peut être séparée en différentes régions. La région près de l'endroit où le fluide entre à l'intérieur du tuyau se nomme région d'entrée. L'écoulement a un comportement non visqueux en ce point. La figure 5.7 montre que la vitesse est pratiquement uniforme au début de la région d'entrée. Une couche limite à la surface du cylindre apparaît par la suite. Les effets visqueux sont importants dans cette zone. La couche limite gagne par la suite en largeur jusqu'à occuper entièrement la section de la conduite. À ce point, on dit que l'écoulement est complètement développé. Ainsi, le profil de l'écoulement à cet endroit est fonction de sa position par rapport au centre de la conduite (r), indépendamment de sa position sur la longueur du tuyau (x).

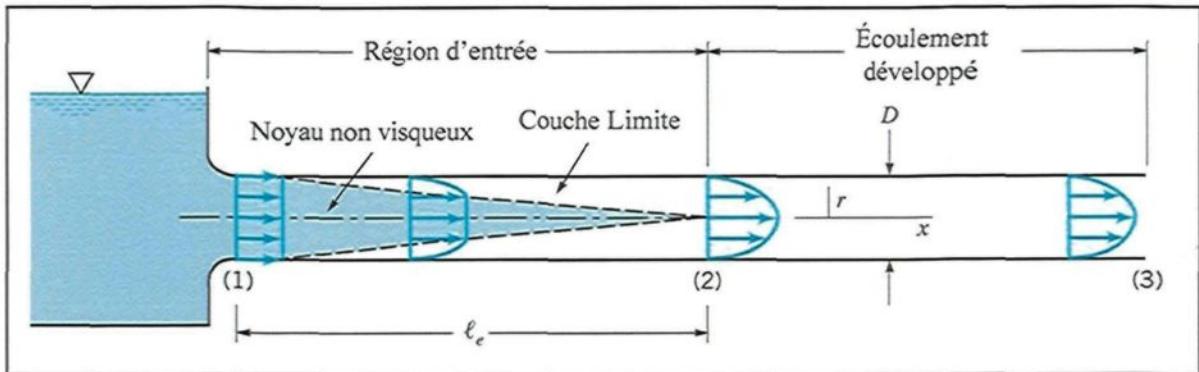


Figure 5.7 Région d'entrée et région développée à l'intérieur d'une conduite [22]

Le nombre adimensionnel de longueur d'entrée l_e/D typique est donné par [23] :

$$\frac{l_e}{D} = 0.06 \text{ Re}, \text{ pour un écoulement laminaire} \quad (5.2)$$

$$\frac{l_e}{D} = 4.4 (\text{Re})^{1/6}, \text{ pour un écoulement turbulent} \quad (5.3)$$

où l_e est la longueur d'entrée et D est le diamètre de la conduite (Figure 5.7)

Pour les petits nombres de Reynolds, cette longueur d'entrée est très petite ($l_e = 0.6 D$ si $\text{Re} = 10$) tandis que pour de grands nombres de Reynolds, l'extrémité du tuyau peut être atteinte avant d'arriver à la fin de la région d'entrée ($l_e = 120 D$ si $\text{Re} = 2000$). Toutefois, pour la majorité des problèmes d'ingénierie, le nombre de Reynolds varie entre $10^4 < \text{Re} < 10^5$, ainsi la longueur d'entrée varie entre $20 D < l_e < 30 D$.

Dans les écoulements en conduite pleine, le mouvement est entraîné principalement par le gradient de pression ($\Delta p = p_1 - p_2$) présent entre les deux extrémités de la conduite. L'effet visqueux présent à l'intérieur de la conduite constitue la force contraignante qui

balance exactement la force de pression, permettant au fluide de traverser la conduite sans accélération. Si les effets visqueux étaient absents de la conduite, le gradient de pression serait nul au travers du tuyau, à l'exception des variations hydrostatiques.

Toutefois, dans le cas de la zone d'entrée de la conduite, une accélération ou une décélération du fluide survient (le profil de vitesse se transforme d'uniforme à l'entrée à développé à la sortie de cette zone). L'amplitude du gradient de pression est donc plus élevée (et variable) à l'entrée de la conduite tandis qu'il sera constant dans la zone développée. La figure 5.8 présente le phénomène :

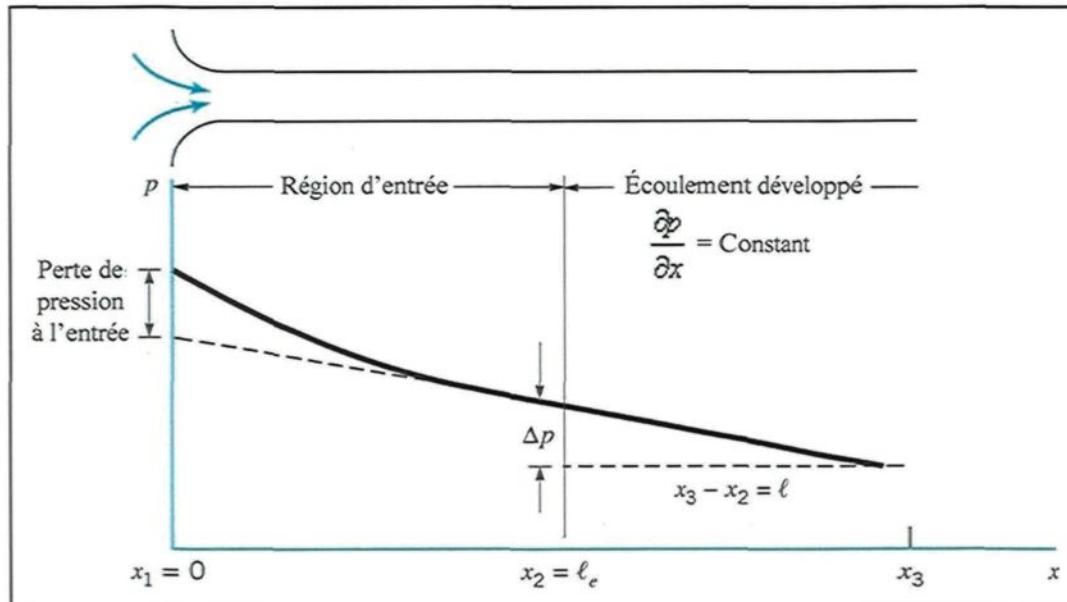


Figure 5.8 Distribution de pression dans un tuyau

5.2.2- Pertes de charge

Les pertes de charges à l'intérieur d'un tuyau peuvent être exprimées en termes de facteur de friction. Il est régulièrement nécessaire de déterminer les pertes de charges, h_L , qui surviennent à l'intérieur d'un écoulement en tuyau. Ces pertes de charges sont divisées en deux parties. La première partie est composée des pertes majeures, $h_{L \text{ majeure}}$, et comprend les pertes de charges dues aux effets visqueux dans les longueurs de tuyau. La seconde partie des pertes, nommée pertes mineures, $h_{L \text{ mineure}}$, comprend toutes les pertes de charges présentes dans les composantes de tuyauterie (valves, coudes, etc.). Ainsi,

$$h_L = h_{L \text{ majeure}} + h_{L \text{ mineure}} \quad (5.4)$$

5.2.2.1- Pertes majeures

Tout d'abord, exprimons l'équation d'énergie découlant de la première loi thermodynamique pour un écoulement stationnaire et incompressible :

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (5.5)$$

où h_L est la perte de charge entre les points 1 et 2,

En considérant un diamètre de tuyau constant ($D_1 = D_2$ ainsi, $V_1 = V_2$), un plan horizontal ($z_1 = z_2$) et un écoulement complètement développé ($\alpha_1 = \alpha_2$), nous pouvons réécrire l'équation 5.5 comme étant :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \gamma h_L \quad (5.6)$$

L'analyse dimensionnelle permet d'exprimer le facteur de friction f , parfois nommé facteur de friction Darcy en l'honneur de Henry Darcy (1803-1858), un ingénieur Français qui fut le premier à établir les effets de la rugosité sur la résistance du tuyau. Cette quantité adimensionnelle s'écrit :

$$f = \Delta p \frac{D/l}{\rho V^2/2} \quad (5.7)$$

En combinant les équations 5.6 et 5.7, nous obtenons :

$$h_{L \text{ majeure}} = f \frac{l V^2}{D 2g} \quad (5.8)$$

L'équation 5.8 se nomme équation de Darcy-Weisbach et cette dernière est valide pour un écoulement en tuyau en régime permanent, complètement développé et incompressible.

Les tuyaux commerciaux n'ont pas tous la même rugosité. Pour cette raison, des tables de rugosité relative ont été constituées pour différents matériaux. Pour les écoulements laminaires, $f = 64 / Re$ et n'est pas dépendant de la rugosité relative. Toutefois, dans le cas de nombre de Reynolds plus grand, le facteur de friction devient fonction de la rugosité relative. Dans ce cas, il devient nécessaire d'employer la table de Moody (figure 5.9) pour déterminer ce facteur. La table de Moody est universellement valide pour tous les écoulements en tuyau en régime permanent, incompressible et complètement développé.

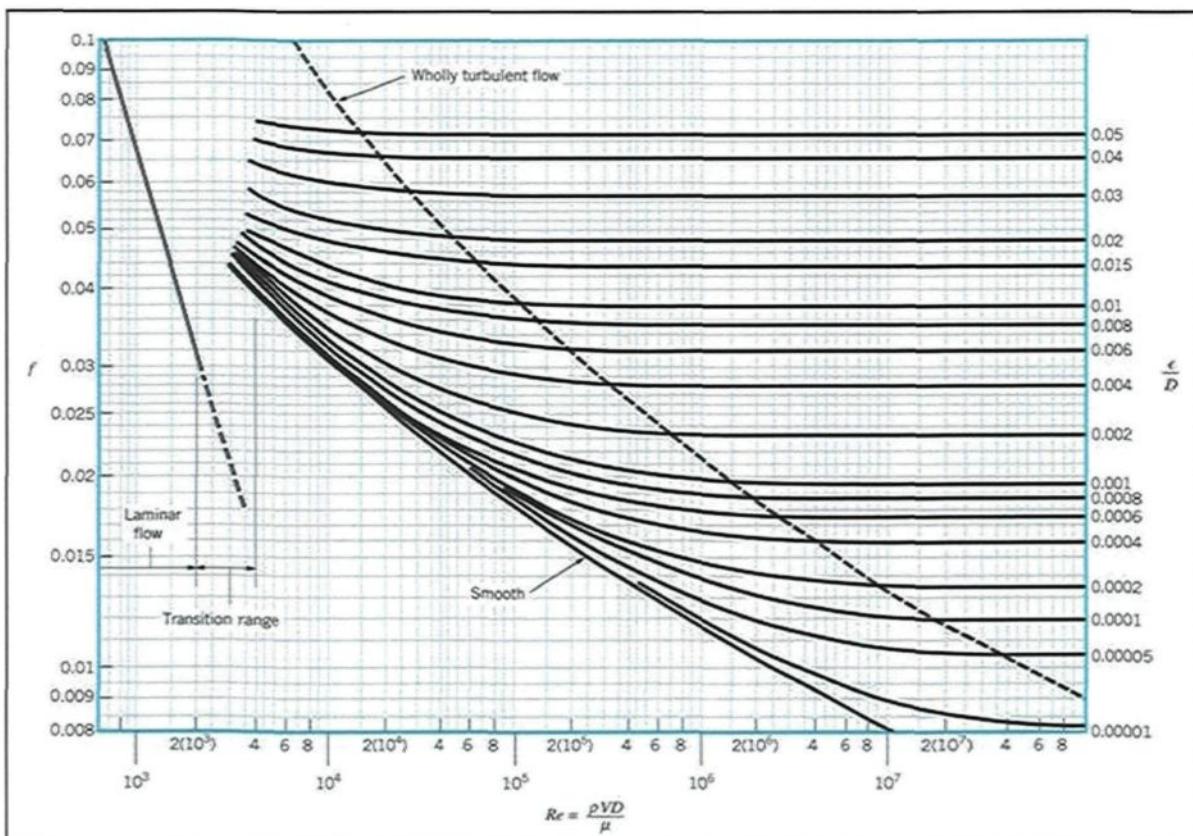


Figure 5.9 Table de Moody

5.2.2.2- Pertes mineures

Les pertes mineures sont les pertes présentes dans les éléments de tuyauterie, tels que les valves, les coude, les restrictions, les entrées et les sorties de tuyaux. La présente section présente les pertes de charges de différents éléments de tuyauterie pertinents pour ce projet.

Due à la complexité des composantes de tuyauterie, il est généralement difficile d'effectuer une analyse théorique afin de prédire en détail l'écoulement de façon à obtenir

les pertes de charges. Pour cette raison, les pertes de charges pour les composantes sont données d'une façon adimensionnelle et sont basées sur des données expérimentales. La méthode généralement employée pour déterminer la perte de charge ou perte de pression consiste à employer un coefficient de perte K_L qui est défini comme :

$$K_L = \frac{h_{L \text{ min eure}}}{\left(\frac{V^2}{2g} \right)} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (5.9)$$

Chaque géométrie d'entrée particulière possède son propre coefficient de perte. La figure 5.10 présente le coefficient de perte K_L pour différentes configurations d'entrée :

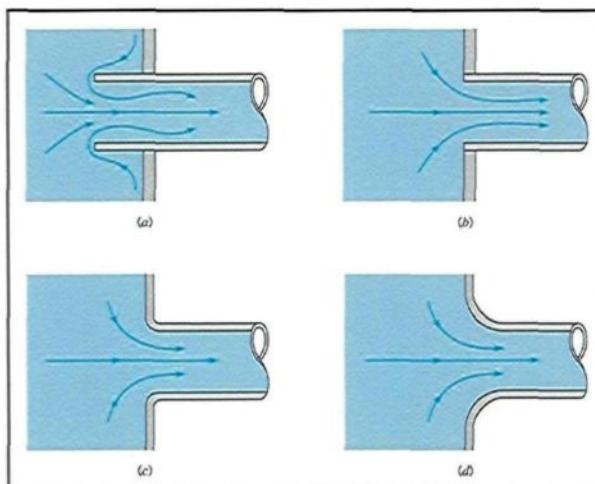


Figure 5.10 Profil du fluide à l'entrée et coefficient de perte pour (a) réentrant, $K_L = 0.8$, (b) arrête vive, $K_L = 0.5$, (c) légèrement arrondi, $K_L = 0.2$, (d) très arrondi, $K_L = 0.04$.

La figure 5.11.a. présente le profil type d'une entrée de tuyau avec une arrête vive. Une région « *vena contracta* » se forme à l'entrée car le fluide résiste au changement de direction. En effet, ce dernier est incapable de longer un coin à angle. Ainsi, il se produit la séparation de l'écoulement avec inversion de pression près de la paroi. Dans le cas idéal, l'énergie cinétique serait convertie en pression (effet de Bernouilli). Toutefois, une partie de l'énergie cinétique est perdue en dissipation visqueuse ce qui retarde le retour à la pression idéale (figure 5.11.b)

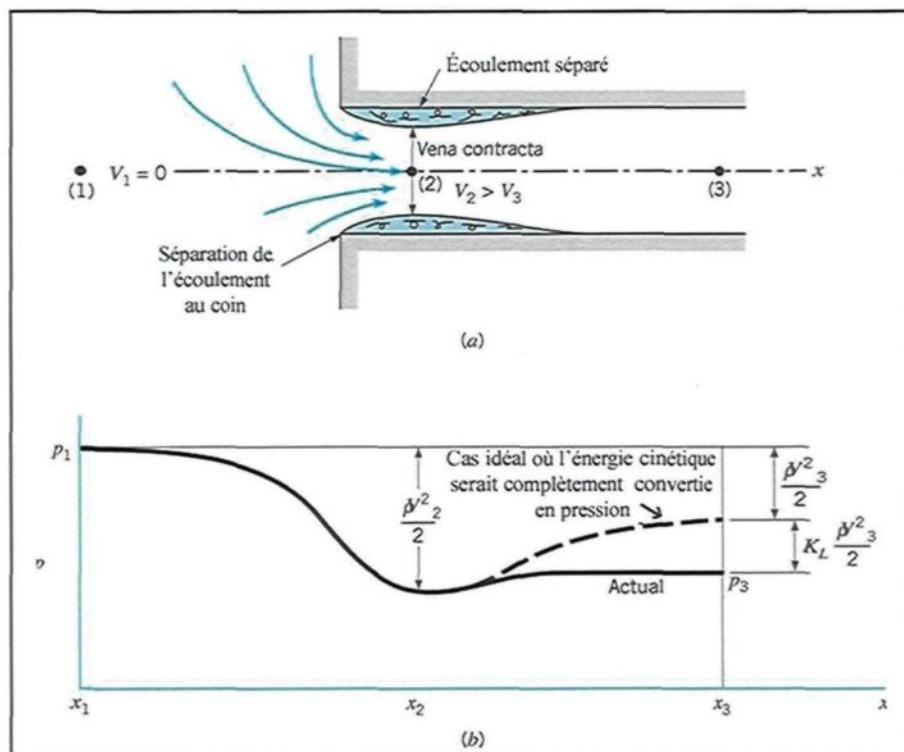


Figure 5.11 Profil d'écoulement et distribution de pression pour une entrée à arrête vive. [22]

Des arrêtes arrondies à l'entrée diminuent significativement le coefficient de pertes tel que le démontre la figure suivante :

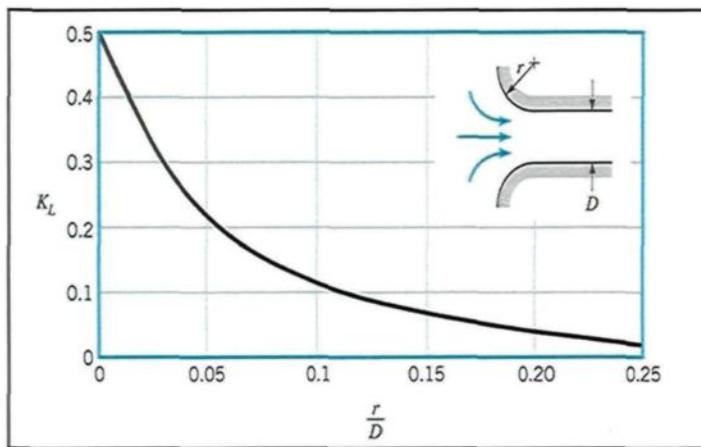


Figure 5.12 Coefficient de perte à l'entrée en fonction du rayon de courbure de l'entrée.

Une perte de charge à la sortie du tuyau est également présente. Dans ce cas, l'énergie cinétique est dissipée au travers des effets visqueux au fur et à mesure que le fluide se mélange avec celui contenu à l'intérieur du réservoir. Il passe ainsi d'une vitesse V_1 à une vitesse nulle. La figure 5.13 présente le coefficient de perte pour différents scénarios :

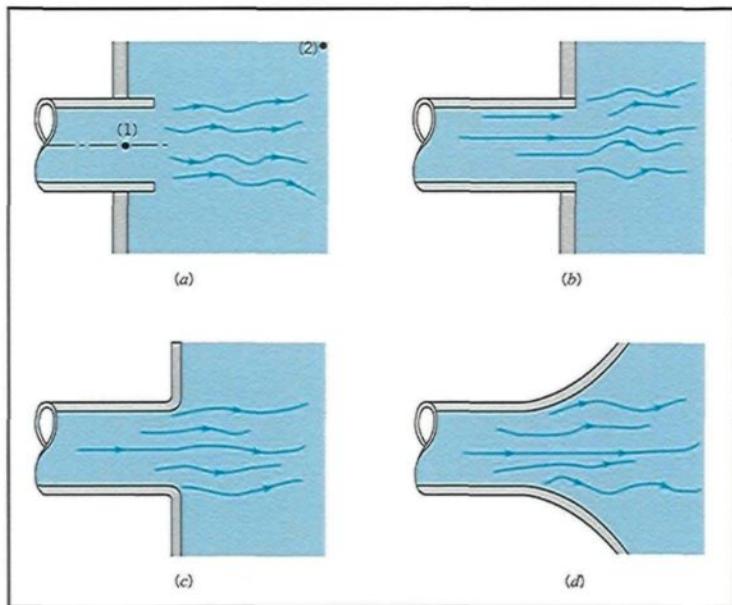


Figure 5.13 Coefficient de perte à la sortie pour (a) réentrant, $K_L = 1.0$, (b) arrête vive, $K_L = 1.0$, (c) légèrement arrondi, $K_L = 1.0$, (d) très arrondi, $K_L = 1.0$.

Il arrive également que le tuyau subisse une réduction ou une expansion soudaine.

La figure 5.14 présente ces deux cas :

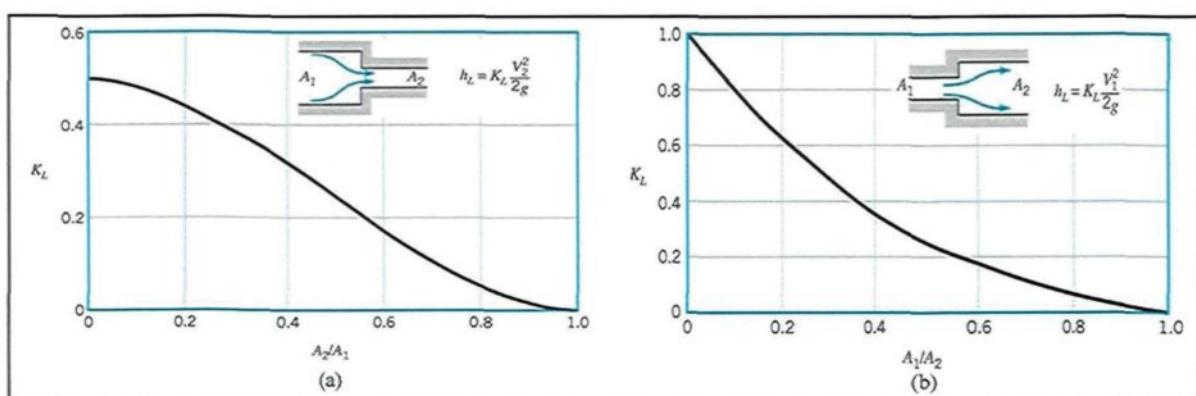


Figure 5.14 Coefficient de perte pour (a) une contraction soudaine, (b) une expansion soudaine.

Les pertes présentes dans un diffuseur (figure 5.15) sont assez différentes de celles présentes dans une expansion soudaine. L'angle d'ouverture a un effet très grand sur le coefficient de perte. De plus, les pertes sont minimales pour un angle optimal de 8 degrés. Le cas à la figure suivante est présenté à titre indicatif puisque les pertes dans un diffuseur diffèrent en fonction du rapport A_2/A_1 .

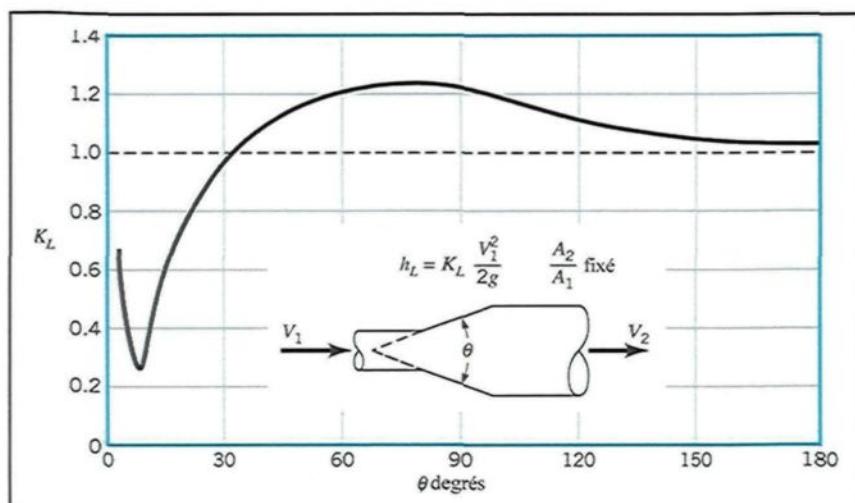


Figure 5.15 Coefficient de perte pour un diffuseur conique typique.

Le dernier cas étudié, celui d'une contraction conique (bec), est moins complexe que le cas du diffuseur. Le coefficient de perte typique varie à titre d'exemple entre $K_L=0.02$ pour un angle de fermeture de 30 degrés et $K_L=0.07$ pour un angle de 60 degrés.

CHAPITRE 6

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS

Pour ce projet, des essais ont été effectués avec des sondes pouvant occuper un volume jusqu'à environ 10 cm^3 à l'intérieur d'écoulement avec un faible nombre de Reynolds. Dans ces conditions, confiner l'écoulement à l'intérieur d'un tuyau s'avère pratiquement irréalisable étant donné la taille des montages. Les essais nécessitent aussi des orientations différentes des montages par rapport à la direction du fluide. L'utilisation d'un écoulement ouvert a donc été retenue. Toutefois, créer un écoulement ouvert avec des vitesses allant de 5 à 30 cm/s en minimisant les turbulences à l'intérieur de ce dernier s'avère très ardu à réaliser en laboratoire. La solution envisagée est donc de déplacer à vitesse constante le montage expérimental à l'intérieur d'un bassin contenant le fluide stagnant. De cette façon, la vitesse relative entre la sonde et le fluide sera obtenue et les turbulences à l'intérieur de l'écoulement seront minimisées.

6.1- Présentation du banc d'essai

Le banc d'essai est constitué d'un réservoir de 3 mètres de long par 35 cm de largeur et 35 cm de hauteur. Sa capacité est de 279 litres de liquide. La longueur du bassin permet un déplacement d'une durée de 10 secondes à la vitesse de 30 cm/s. Trois fenêtres ont été installées au tiers de sa longueur : deux sur les parois latérales et une sur le fond. Ces fenêtres permettent l'utilisation d'un appareil de vélocimétrie par image de particules (PIV) au cours des expérimentations.

L'entraînement du montage expérimental s'effectue à l'aide d'un chariot se déplaçant sur un rail monté au dessus du bassin. Un moteur à courant continu de forte puissance permet au chariot de se déplacer à vitesse constante. Un automate programmable contrôle le départ et l'arrêt du chariot. Afin de respecter les normes de sécurité en vigueur chez Alcan, une procédure d'analyse des risques environnementaux (PARE) a été effectuée sur le montage. Des mesures de sécurité additionnelles ont été ajoutées au montage. Un écran de protection à l'avant du bassin a été installé afin de protéger les utilisateurs d'éventuelles éclaboussures. De plus, un bassin de récupération a été installé sous le montage afin de récupérer d'éventuels déversements.

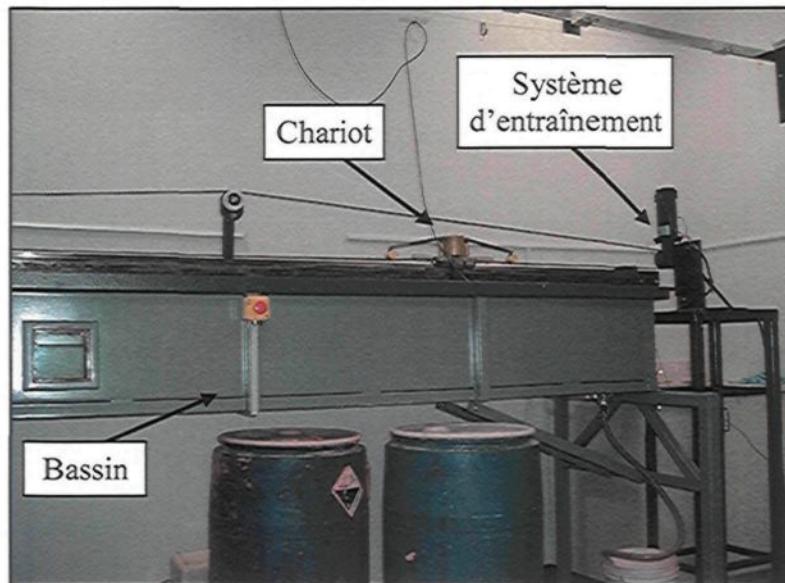


Figure 6.1 Banc d'essai

6.1.1- Modifications effectuées au montage expérimental

Des tests préliminaires ont démontré que la surface du bassin d'acier agissait comme une électrode participant à la réaction d'électrochimie. Ainsi, les courants mesurés à l'aide de la sonde électrochimique se trouvaient faussés étant donné qu'une partie du courant fuyait vers le bassin. Afin de résoudre le problème, une peinture isolante à base d'époxy a été appliquée à l'intérieur du bassin. Cette peinture a permis d'éliminer les problèmes de courant de fuite sur le montage.

D'autres tests préliminaires ont permis de mettre en évidence la grande imprécision des mesures effectuées avec les sondes électrochimiques fixées au chariot. Une des causes expliquant cette imprécision est les vibrations présentes dans le montage. Dans le but d'éliminer une grande partie de ces vibrations, différentes modifications ont été réalisées sur le banc d'essai.

- Initialement, un moteur pas-à-pas avec une résolution de 0.7 degré par pas entraînait la courroie déplaçant le chariot. Ce moteur n'était pas adéquat pour le montage. Chaque pas générait une impulsion faisant osciller la courroie du chariot. Dans le but de rendre le mouvement plus fluide, ce moteur fut remplacé par un moteur DC. Ce type de moteur génère moins d'oscillations de la paroi et de vibrations du bassin que le moteur pas à pas.
- Le moteur initial était fixé au bassin. Des modifications ont permis de séparer le moteur du bassin en l'installant sur un support indépendant fixé sur le plancher du laboratoire. Cette forme d'isolation a permis de grandement diminué le niveau des vibrations dans le montage.
- Initialement, le rail sur lequel se déplaçait le chariot était en position vertical. Les roulements à billes du chariot sont placés sur les côtés de ce dernier. Ainsi, toute la charge reposait uniquement sur les roulements à billes du haut. Pour faciliter le roulement, le rail a été installé à l'horizontal. De cette façon, tous les roulements à billes supportent le poids du chariot.
- Parce que le chariot était trop léger, de la masse a été ajoutée à ce dernier dans le but d'augmenter son inertie. Cette masse a rendu le mouvement plus régulier et a également diminué l'amplitude des vibrations.

- Une masse fut installée aux deux extrémités du chariot dans le but d'amortir encore plus les vibrations.
- Le diamètre de la tige fixant la sonde au chariot a été augmenté dans le but de réduire les vibrations.
- Des joints de caoutchouc ont été appliqués entre chacune des pièces du montage.

Ces modifications ont permis de grandement réduire l'intensité des vibrations propagées dans le montage expérimental. Ces améliorations ont augmenté la précision des mesures prises à l'aide de la sonde électrochimique.

6.2- Système de prise de mesures

La méthode développée dans ce travail utilise une tension appliquée aux bornes d'une cellule électrochimique pour produire un courant électrique qui dépend de l'écoulement. Pour ce faire, une source de tension de laboratoire 0-25 VDC est raccordée à la sonde et une mesure du courant est effectuée par le biais d'une résistance shunt de 10 ohms raccordée à une carte d'acquisition Instrunet 100. L'acquisition des données est démarrée par l'expérimentateur après le départ du chariot transportant la sonde et est arrêtée un instant avant son arrivé à la l'extrémité du bassin. La prise de données est effectuée à la fréquence de 100 Hz.

Les caractéristiques de la carte d'acquisition *Instrunet 100* sont présentées au tableau 6.1 :

Paramètre	Valeur en volts	Valeur en ampères (avec utilisation d'une résistance shunt)
Échelle maximale	0.6 Volts	60 mA
Résolution	14 bits (0.03662 mV / échelon)	0.0036 mA / échelon
Précision absolue	+/- 150 µV	+/- 15 µA

Tableau 6.1 Caractéristiques de la carte d'acquisition de données

6.3- Électrolyte

Les travaux antérieurs ont permis le développement d'une méthode permettant de déterminer la grandeur de la vitesse de l'écoulement à partir de différents paramètres, tels la concentration en NaOH, la causticité, le ratio alumine/caustique, et la température. Les présents travaux consistent à déterminer la direction de l'écoulement. Pour cette raison, le problème n'est plus de trouver une valeur précise en fonction de différents paramètres mais bien de mettre en évidence la provenance de l'écoulement. Ainsi, ce travail consiste à mettre en évidence les variations dans la lecture du courant en fonction de la position des électrodes par rapport à l'écoulement. Dans le but de faciliter les expérimentations sur la capacité directionnelle des différentes sondes électrochimiques utilisées, les autres paramètres affectant le courant électrique des sondes sont maintenus constants. Ainsi, l'électrolyte se compose uniquement d'une solution aqueuse de NaOH à une concentration de 50 g/L de NaOH maintenue à la température ambiante.

6.4- Prototypes de sondes testés

Quatre différents prototypes de sondes ont été testés. Cette section présente ces sondes et les résultats obtenus dans les tests.

6.4.1- Électrodes libres

Au cours de ses travaux, *Perron* [4, 5, 6] a développé un prototype expérimental de débitmètre électrochimique constitué d'un support massif de plexiglas en forme de « U » inversé au bout duquel sont fixés deux électrodes de platine de 0.5 mm de diamètre et d'une longueur de 1.3mm espacées entre elles de 2.5 mm. Ce dernier a observé une capacité directionnelle à son prototype par rapport à la direction du fluide. Des essais ont été effectués afin de vérifier si la capacité directionnelle observée par *Perron* est due à la géométrie de son prototype ou à la position des électrodes par rapport à l'écoulement. Dans le but de vérifier l'influence de la position des électrodes par rapport à l'écoulement, deux électrodes cylindriques de platine ayant un diamètre de 0.5 mm et une longueur de 1.3 mm ont été soudées à deux fils de cuivre de calibre 24 recouvert d'un vernis isolant. Elles ont été placées face à face et espacées de 2.5 mm. Elles constituent la configuration d'électrodes utilisée par *Perron* [4, 5, 6] sans toutefois comporter un support imposant. La figure 6.2 présente le montage employé :

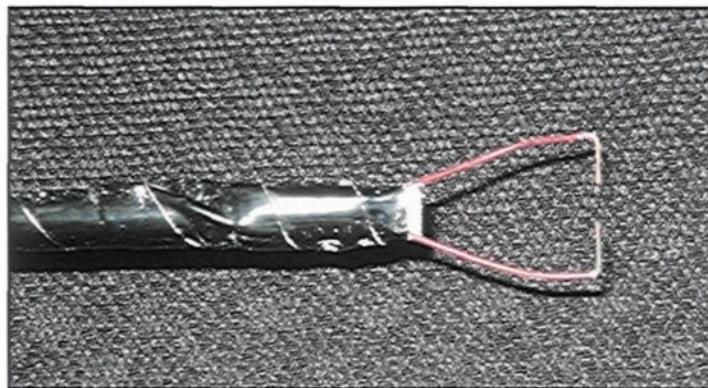


Figure 6.2 Montage « électrodes libres »

Ce montage a été simplifié au maximum dans le but d'éviter autant que possible les interactions entre le support des électrodes de la sonde à « électrodes libres » et l'écoulement, l'objectif étant de mesurer l'effet entre un écoulement axial et normal aux électrodes de platine sans interférence due au support en forme de « U ». Pour ce test, une solution de NaOH à 50 g/L à la température de la pièce a été utilisée. Une tension de 6 volts a été appliquée aux bornes des électrodes. Le courant moyen de la cellule électrochimique a été mesuré pour deux vitesses différentes. Chaque test a été répété 4 fois.

Voici tout d'abord un exemple type d'une acquisition de données effectuée à l'aide du banc d'essai :

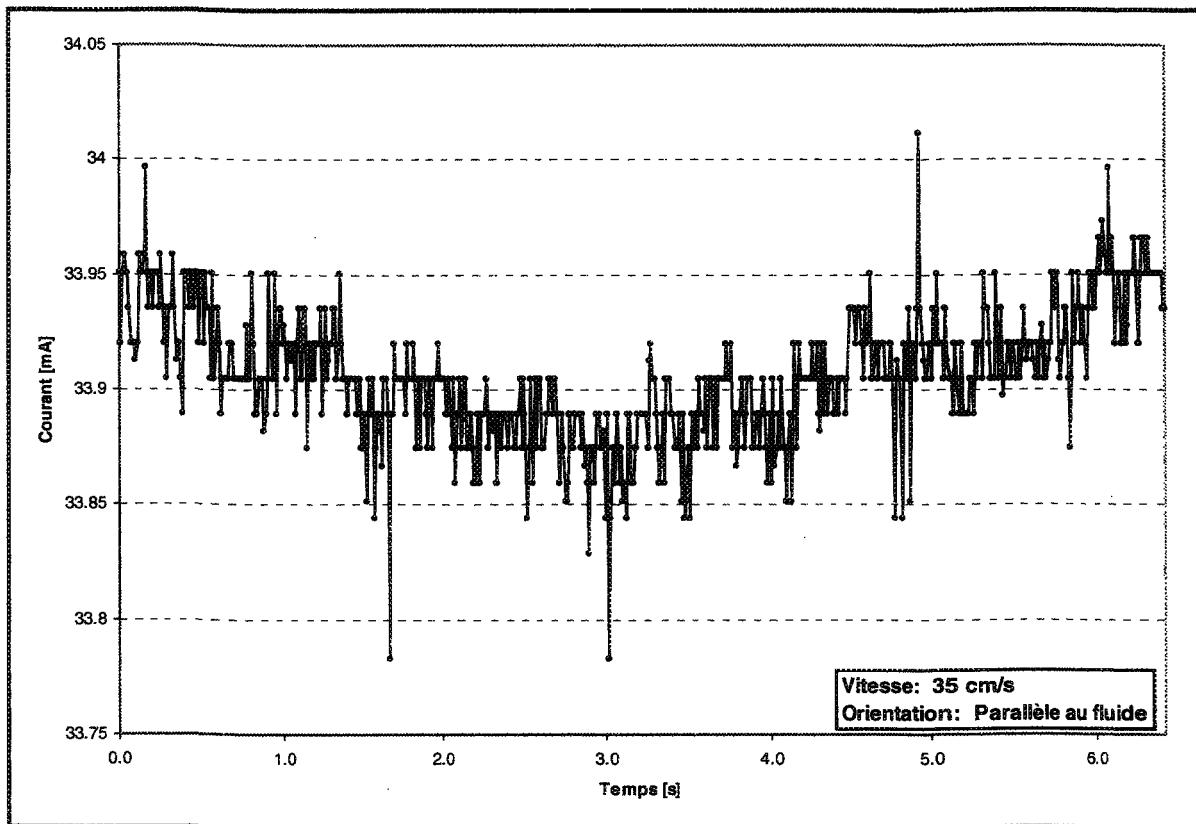


Figure 6.3 Courant de la sonde « électrodes libres » en fonction du temps lors d'une prise de mesure sur banc d'essai

La figure 6.3 permet de constater les variations dans le temps du courant de la cellule électrochimique pour une condition donnée. Environ 600 mesures sont prises durant l'acquisition de données. Dans le cas présenté à cette figure, le courant moyen est de 33.910 mA et l'écart-type sur les points mesurés est de 0.028 mA.

Les tableaux 6.2 et 6.3 montrent les résultats obtenus pour l'ensemble des prises de mesures effectuées aux vitesses de 7 cm/s et 35 cm/s. Il présente le courant moyen calculé pour chaque test ainsi que l'écart-type sur les mesures de ces tests.

	7 cm/s			
	Electrodes perpendiculaires à l'écoulement		Electrodes parallèles à l'écoulement	
	Courant moyen [mA]	Ecart-type [mA]	Courant moyen [mA]	Ecart-type [mA]
Test 1	31.192	0.071	28.553	0.105
Test 2	30.911	0.063	28.732	0.074
Test 3	30.770	0.069	28.870	0.051
Test 4	30.647	0.056	22.855	9.471

Tableau 6.2 Courant moyen des électrodes vs vitesse à 7 cm/s

	35 cm/s			
	Electrodes perpendiculaires à l'écoulement		Electrodes parallèles à l'écoulement	
	Courant moyen [mA]	Ecart-type [mA]	Courant moyen [mA]	Ecart-type [mA]
Test 1	35.617	0.491	33.918	0.041
Test 2	35.324	0.0431	33.606	0.069
Test 3	35.029	0.0788	33.338	0.041
Test 4	35.196	0.0488	33.260	0.064

Tableau 6.3 Courant moyen des électrodes vs vitesse à 35 cm/s

Le tableau 6.4 présente la moyenne des mesures de courant de l'ensemble des tests effectués ainsi que l'écart-type relié à ces tests. Le test numéro 4 à 7 cm/s avec électrodes parallèles à l'écoulement a été éliminé.

Position des électrodes par rapport à l'écoulement	7 cm/s			35 cm/s		
	Courant moyen [mA]	Ecart-type du courant moyen [mA]	Nombre de reproductions	Courant moyen [mA]	Ecart-type du courant moyen [mA]	Nombre de reproductions
Perpendiculaires	30.880	0.234	4	35.291	0.248	4
Parallèles	28.718	0.159	3	33.531	0.298	4

Tableau 6.4 Moyenne du courant moyen des électrodes vs vitesse

Un test de comparaison sur deux moyennes à l'aide de la loi de Student [24] a été effectué afin de vérifier si les courants mesurés pour les électrodes en position parallèles et perpendiculaires étaient similaires ou différents.

Avec un seuil de signification de 95 %, le test de comparaison démontre que les moyennes de courant moyen pour les deux scénarios étudiés (électrodes parallèles et perpendiculaires) sont différentes et ce pour les deux vitesses étudiées.

Il est donc possible de conclure que la position des électrodes par rapport à l'écoulement influence le courant de la cellule électrochimique. En effet, le courant est supérieur lorsque les électrodes sont perpendiculaires à l'écoulement. Toutefois, la variation entre la mesure du courant selon l'orientation de la sonde est faible si l'on compare ces résultats à ceux que Perron [4, 6] avait observé en effectuant la rotation de son prototype dans un écoulement. La variation dans l'amplitude du courant de son prototype

selon la position de ce dernier avait été expliquée par le fait que la surface de l'électrode exposée à l'écoulement était plus grande lorsque ces dernières se retrouvaient perpendiculaires à la direction du fluide. Les présentes mesures permettent toutefois de spécifier que l'orientation de la surface exposée des électrodes a un effet minime sur le courant de la cellule électrochimique. Notre test démontre plutôt que la géométrie de la sonde a un effet plus important. Ainsi, lorsque les électrodes de la sonde de *Perron* sont parallèles à l'écoulement, les perturbations hydrodynamiques que génèrent le support des électrodes a une plus grande influence sur la réaction électrochimique que peut en avoir la position des électrodes.

6.4.2- Utilisation d'une sphère

Le concept de la sphère a été envisagé dès le début du projet pour différentes raisons. Tout d'abord, l'objectif est de développer un appareil de mesure fixe et nécessitant le moins de mouvements possibles. De plus, une configuration très symétrique et perturbant au minimum l'écoulement semblait instinctivement un choix judicieux pour réaliser cet objectif. Pour cette raison, la sphère représente une tentative prometteuse. La sphère comporte un point de stagnation à l'avant et une zone de décrochement à l'arrière. De plus, l'épaisseur de la couche de diffusion varie en fonction de la position sur la sphère lorsqu'elle est dans l'écoulement. En plaçant des paires d'électrodes à différents points stratégiques sur la sphère, la comparaison des courants mesurés en ces différents points devraient permettre de déterminer la provenance de l'écoulement frappant cette dernière.

6.4.2.1- Description du montage

Le montage est constitué d'une sphère non conductrice de polymère translucide d'un diamètre de 38.1 mm. Afin de faciliter les expérimentations, seulement deux paires d'électrodes ont été installées sur la sphère. Chaque paire d'électrodes est constituée d'une anode circulaire d'un rayon de 2 mm encastrée à la surface de la sphère et d'une cathode de 2.4 mm de longueur placée au centre de l'anode circulaire en saillie perpendiculaire à la surface de la sonde. Les électrodes sont constituées de fil cylindrique de platine d'un diamètre de 0.5mm. Les deux paires d'électrodes ont été installées à 180 degrés d'intervalle, suivant le plan horizontal. Lors de l'électrolyse de l'eau, l'hydrogène généré à la cathode est en quantité double de l'oxygène générée à l'anode. Dans le but de faciliter l'évacuation des bulles d'hydrogène, la cathode a été choisie comme étant l'électrode en saillie à la surface de la sphère.



Figure 6.4 Sonde sphérique

6.4.2.2- Détermination de la tension d'opération de la sonde sphérique

La tension d'opération de la sonde sphérique doit être sélectionnée de façon à ce que l'ordre de grandeur des courants lus soit adéquat. Le courant produit par la cellule électrochimique doit être facilement mesurable à l'aide d'un multimètre standard. Le potentiel appliqué doit être suffisamment élevé pour engendrer l'électrolyse de l'eau mais sans toutefois produire un courant trop élevé. En effet, un courant excessif entraîne des réactions très rapides et génère ainsi une grande quantité de bulles de gaz. Une trop grande quantité de gaz réduit la capacité de la sonde électrochimique à mesurer de basses vitesses. La poussée d'Archimède entraîne les bulles dans le sens contraire de la gravité. À l'aide de cette poussée, un régime de convection naturelle est établi près de la surface des électrodes. En somme, toute vitesse inférieure au régime de convection naturelle sera indétectable par la sonde. Un compromis entre un courant facile à mesurer et un courant engendrant une convection naturelle trop grande est nécessaire. Pour cette raison, la mesure du courant de la cellule électrochimique en fonction de la tension appliquée a été réalisée à l'intérieur d'une solution au repos de NaOH à une concentration de 50 g/L et à température pièce. Les résultats de cette expérimentation sont présentés à la figure 6.5 :

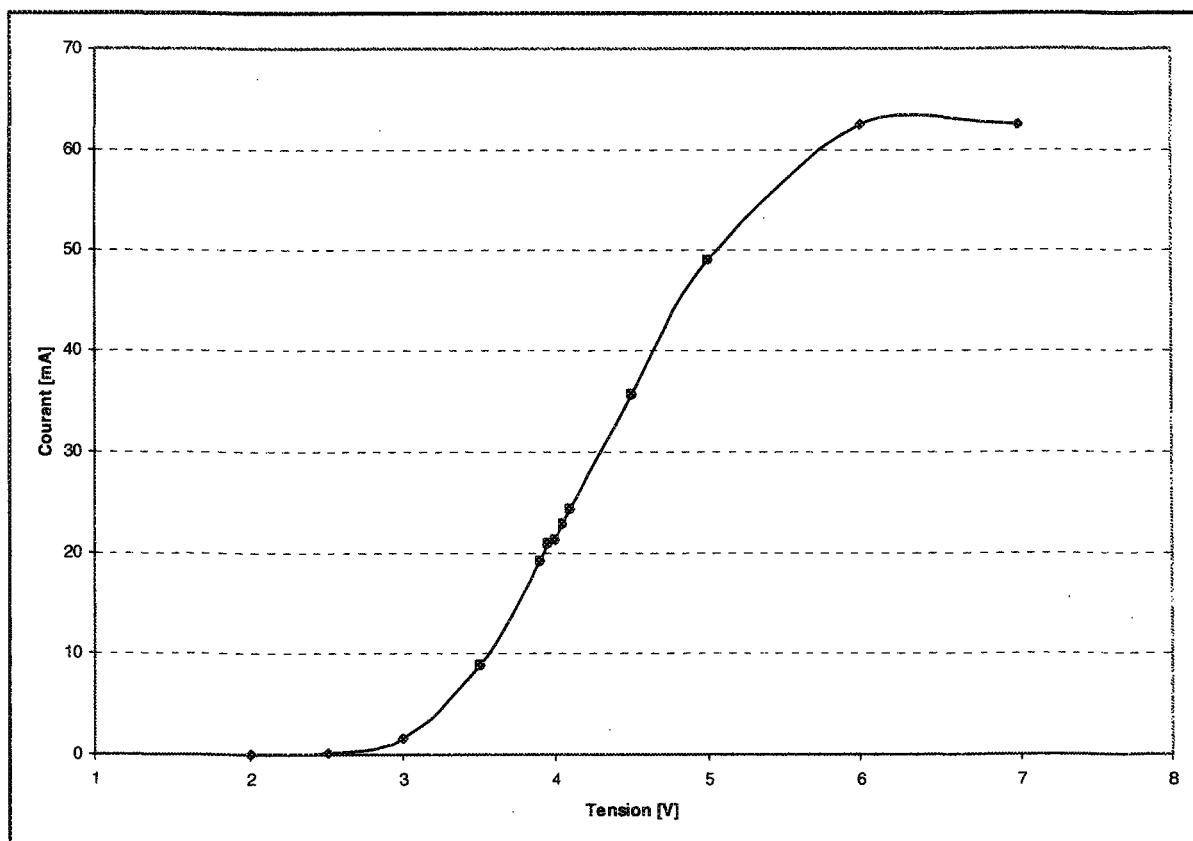


Figure 6.5 Courant de la cellule électrochimique en fonction de la tension appliquée

Au-dessous de 2.5 volts, le courant est inférieur à 1 milliampère et est difficilement mesurable. À partir d'environ 6 volts, un plateau est atteint. On peut également remarquer que le courant varie de façon pratiquement linéaire entre 3.5 et 5 volts. Pour limiter la convection naturelle, pour s'assurer que la réaction d'électrolyse de l'eau est bien enclenchée et pour d'autres considérations pratiques, la tension d'opération de la sonde a été fixée à 4 volts.

6.4.2.3- Mesure des interrelations entre les paires d'électrodes

Avant de débuter les tests, il s'avère nécessaire de mesurer l'influence mutuelle de chaque électrode. La distance entre les membres d'une même paire d'électrodes étant beaucoup plus petite que celle entre les deux paires d'électrodes laisse croire que l'influence mutuelle entre les deux paires d'électrodes serait négligeable. Une série de tests fut effectuée en utilisant simultanément les deux paires d'électrodes. La figure 6.6 décrit les différents schémas de connexion utilisés. Ils sont composés d'une source de tension continue, des anodes A et B reliés ou non à la borne positive de la source et des cathodes A et B, chacun reliés à un ampèremètre. Finalement, les deux ampèremètres sont reliés ou non à la borne négative de la source tension.

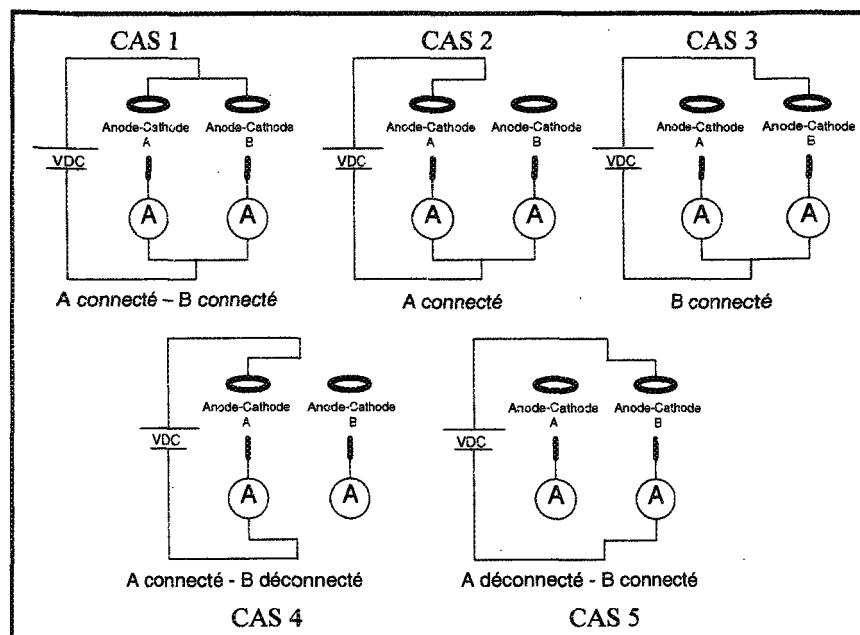


Figure 6.6 Schéma de connexion des électrodes

Ainsi, 5 cas ont été étudiés :

Cas 1 : Les paires d'électrodes A et B sont reliés à leurs ampèremètres respectifs et connectés à la source de tension continue.

Cas 2 : La paire d'électrodes A est reliée à son ampèremètre et connecté à la source de tension continue. L'anode B n'est pas reliée à la borne positive de la source de tension mais la cathode B est relié à son ampèremètre et connectée sur la borne négative de la source.

Cas 3 : L'anode A n'est pas reliée à la borne positive de la source de tension mais la cathode A est relié à son ampèremètre et connectée sur la borne négative de la source. La paire d'électrodes B est reliée à son ampèremètre et connecté à la source de tension continue.

Cas 4 : Il y a uniquement la paire d'électrodes A qui est raccordée à la source de tension continue. La paire d'électrodes B n'est aucunement raccordée au montage.

Cas 5 : La paire d'électrodes A n'est aucunement raccordée au montage. Il y a uniquement la paire d'électrodes B qui est raccordée à la source de tension continue.

L'expérimentation s'est déroulée à l'intérieur d'une solution de NaOH à 50 g/L à la température de la pièce. Le courant moyen de la cellule électrochimique a été mesuré pour les paires d'électrodes A et B dans chacun des 5 cas. Le montage était à l'arrêt. La figure 6.7 présente les résultats :

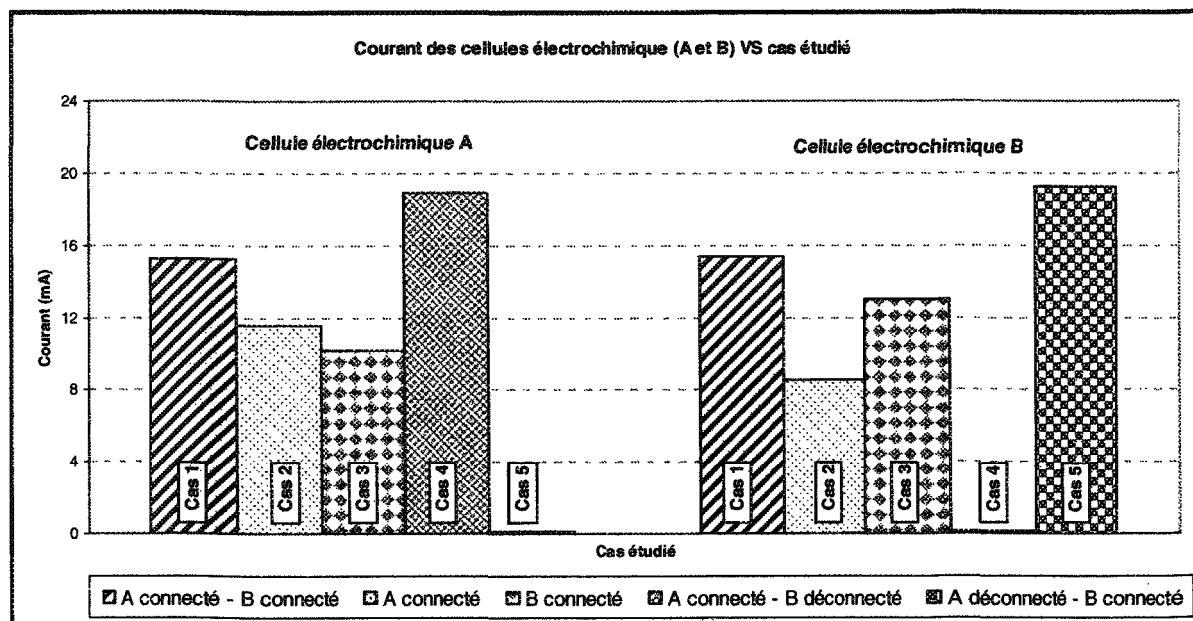


Figure 6.7 Courant des cellules électrochimiques en fonction du cas étudié

Les résultats obtenus démontrent que les deux paires d'électrodes A et B interfèrent entre elles de façon significative lorsqu'elles sont raccordées simultanément à la même source de tension (cas 1). En effet, la différence entre la valeur du courant lorsqu'une seule paire d'électrode est raccordée au montage (cas 4 et 5) et la mesure prise lorsque les deux paires d'électrodes sont raccordées (cas 1) est de l'ordre de 20%. Les cas 2 et 3 démontrent également la présence d'un courant de fuite vers la seconde cathode, même si l'anode de cette seconde paire est non connectée.

Cette expérimentation a permis de déterminer qu'il était impossible d'employer plus d'une cellule électrochimique à la fois. De plus, dans le cas où plusieurs cellules électrochimiques seraient installées sur un montage, il serait absolument nécessaire de débrancher toutes les anodes et les cathodes ne servant pas à la mesure en cours.

6.4.2.5- Définition de l'angle de mesure

Au cours des tests qui seront décrits dans les sections suivantes, la sonde sphérique sera déplacée dans l'écoulement selon différents angles. Cet angle est mesuré entre l'axe des paires d'électrodes par rapport au sens de direction de l'écoulement. La paire d'électrodes active sera toujours positionnée selon le plan horizontal et effectuera une rotation autour de l'axe vertical. On considérera un angle de 0 degré comme étant l'angle lorsque l'écoulement frappe la paire d'électrodes actives directement. L'angle de 180 degrés sera défini comme étant l'angle lorsque la paire d'électrodes actives se trouve dans le sens opposé à l'écoulement ou encore lorsque le corps de la sonde agit comme un écran entre le fluide et les électrodes. La figure 6.8 présente le diagramme d'écoulement correspondant.

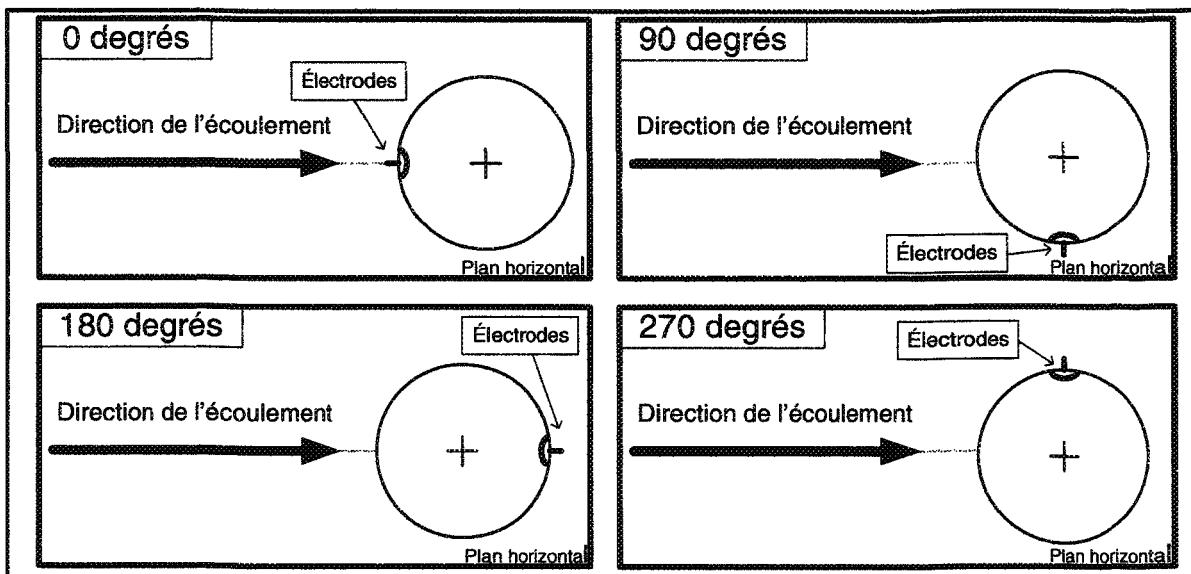


Figure 6.8 Angle des électrodes par rapport à l'écoulement sur un plan horizontal

6.4.2.6- Effet de la variation de l'angle de l'écoulement sur la sonde

Dans le but de caractériser la sonde sphérique, une série de tests a été effectuée afin de mesurer le courant de la cellule électrochimique en fonction de l'angle des électrodes par rapport à l'écoulement autour de la sonde. Pour réaliser ces tests, la sonde sphérique a été immergée dans le bassin contenant une solution de NaOH à une concentration de 50 g/L et à la température de la pièce. Les tests ont été effectués à différentes vitesses. La figure 6.9 présente le résultat du courant mesuré à une vitesse de 10 cm/s en fonction de la position angulaire de la paire d'électrodes.

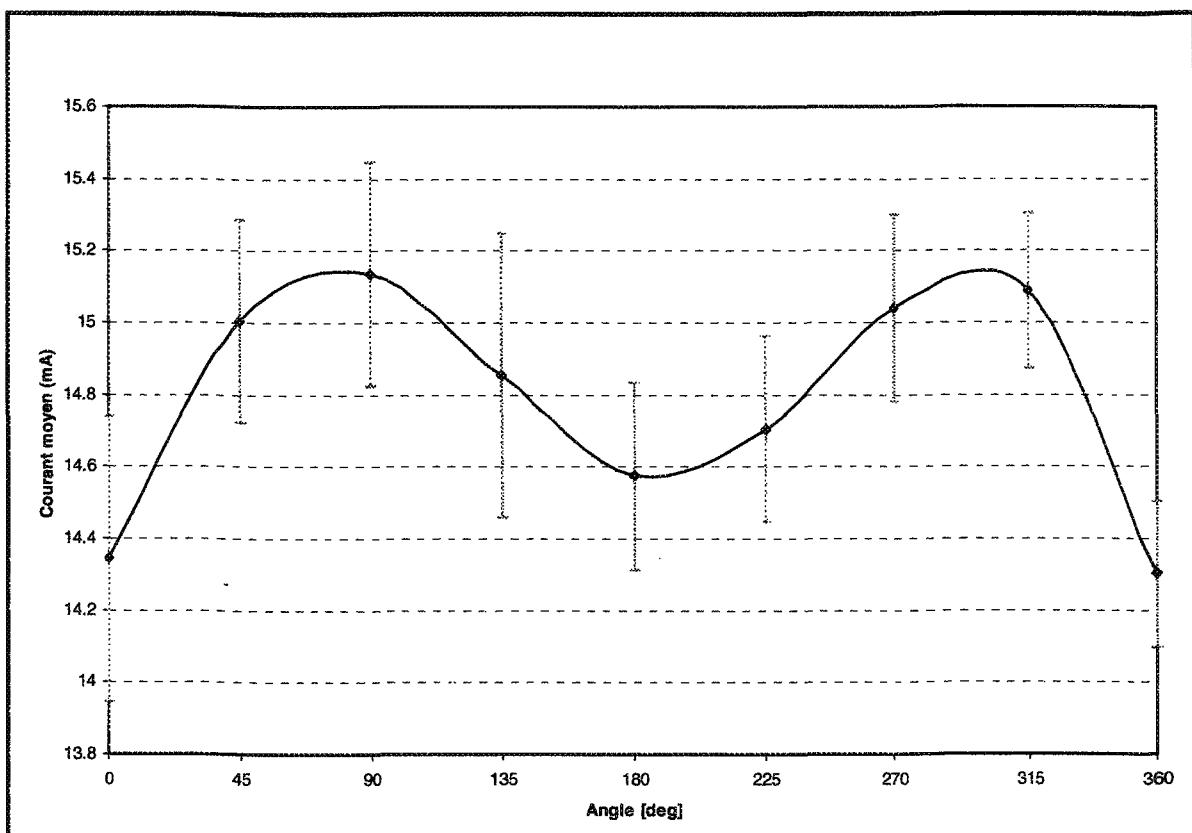


Figure 6.9 Courant de la sonde sphérique en fonction de son angle par rapport à l'écoulement

L'observation des résultats permet de constater que le courant est minimal lorsque l'écoulement frappe directement les électrodes (0 et 360 degrés). Le maximum du courant se mesure quant à lui entre 45 et 90 degrés (270 et 315 degrés). Finalement, un minimum local est présent à 180 degrés. De plus, la courbe est symétrique par rapport aux angles 0, 180 et 360 degrés. Deux hypothèses nous amènent à expliquer le minimum mesuré à 0 degré. Tout d'abord, la théorie stipule qu'un point de stagnation est présent à l'avant d'une sphère. À l'intérieur de cette zone, l'électrolyte a une vitesse nulle. Ainsi, l'épaisseur de la couche de diffusion autour des électrodes est plus grande car les mouvements de convections sont plus faibles due à la couche de stagnation. La réaction d'oxydoréduction

se trouve ralentie car l'apport en réactifs et l'évacuation des produits sont diminués. Puisque la réaction d'oxydoréduction est moins importante, il est normal que le courant mesuré soit plus faible. Le point de stagnation est toutefois un lieu théoriquement très petit. La cathode de la cellule électrochimique forme une saillie perpendiculaire à la surface de la sonde sphérique sur une distance de 2.4 mm. Elle doit donc se trouver, en partie, à l'extérieur du point de stagnation. La cathode est dans une position parallèle à l'écoulement. La surface exposée à l'écoulement est minimale. En effet la majeure partie de sa surface se retrouve parallèle à l'écoulement et c'est uniquement l'anode circulaire (soit la section du fil de platine de 0.5 mm de diamètre) qui est perpendiculaire au mouvement du fluide. Globalement, la convection présente autour des électrodes est minimale. La couche de diffusion est ainsi plus grande et moins de courant circule à l'intérieur de la cellule électrochimique.

Le minimum local présent à 180 degrés s'explique par le fait que les électrodes se trouvent protégées de l'exposition au mouvement du fluide par la présence du corps de la sonde entre le fluide en déplacement et la cellule électrochimique. Cette protection minimise le transfert de réactifs et de produits aux électrodes. Toutefois, la présence de turbulences à l'arrière de la sphère expose les électrodes à un mouvement de fluide plus important que le point de stagnation à l'avant. Pour cette raison, le courant de la réaction électrochimique n'est pas un minimum absolu.

Dans le cas où la paire d'électrodes est orientée dans la zone entre 45 et 90 degrés ou 270 et 315 degrés, la surface de la cathode exposée au mouvement du fluide est maximale. En effet, cette dernière se trouve à être perpendiculaire à l'écoulement sur sa longueur (2.4 mm). Le transport des réactifs et des produits s'effectue donc plus facilement et le courant de la cellule électrochimique est donc maximal.

L'écart entre l'amplitude minimale et maximale du courant mesuré en effectuant la rotation de la sonde dans l'écoulement est d'environ 0.83 mA tandis que l'écart type sur les mesures est en moyenne de 0.28 mA. La précision des mesures ne permet pas de déterminer sans ambiguïté l'angle que fait la sonde par rapport à l'écoulement. Dans le meilleur des cas, en considérant un intervalle de 180 degrés entre le courant maximal et minimal, une précision de l'ordre de ± 60 degrés serait prévue. Cette précision est inacceptable afin de déterminer la provenance de l'écoulement.

6.4.2.6- Effet de la longueur de la cathode sur la précision mesure du courant

Les expérimentations décrites à la section précédente ont démontré que la configuration actuelle de la sonde sphérique n'est pas en mesure de déterminer avec une marge d'erreur raisonnable la direction de l'écoulement. Il est donc nécessaire d'envisager des modifications de façon à améliorer les performances de la sonde. Une piste de solution pour tenter de résoudre le problème est d'étudier les effets de la variation de la longueur de la cathode sur le courant de la cellule électrochimique. En effet, la cathode présentement

utilisée est d'une longueur de 2.4 mm. Elle émerge possiblement de la couche limite hydrodynamique de la sphère. Si tel est le cas, le gradient de vitesse autour de la sonde causé par la forme sphérique de cette dernière est peut-être négligeable, ce qui empêche d'obtenir des mesures suffisamment significatives et reproductibles pour être en mesure de déterminer la direction de l'écoulement.

Dans le but de vérifier l'influence de la longueur de la cathode sur le comportement de la cellule électrochimique, des essais ont été effectués pour trois longueurs différentes soit 2.4 mm, 1.2 mm et 0 mm. La longueur de zéro millimètres signifie que la cathode a été coupée directement à la surface de la sphère. Ainsi dans ce cas, la surface en contact avec l'électrolyte correspond à la section du fil de platine de 0.5 mm de diamètre. Une série de tests a été effectuée afin de mesurer le courant de la cellule électrochimique en fonction de la provenance de l'écoulement sur la sonde pour les trois longueurs de cathodes définies précédemment. Pour réaliser ces tests, la sonde sphérique a été installée sur le banc d'essai. Elle a été immergée dans une solution de NaOH à une concentration de 50 g/L. La solution était à la température de la pièce. La figure 6.10 présente le résultat des mesures prises à une vitesse de 15 cm/s :

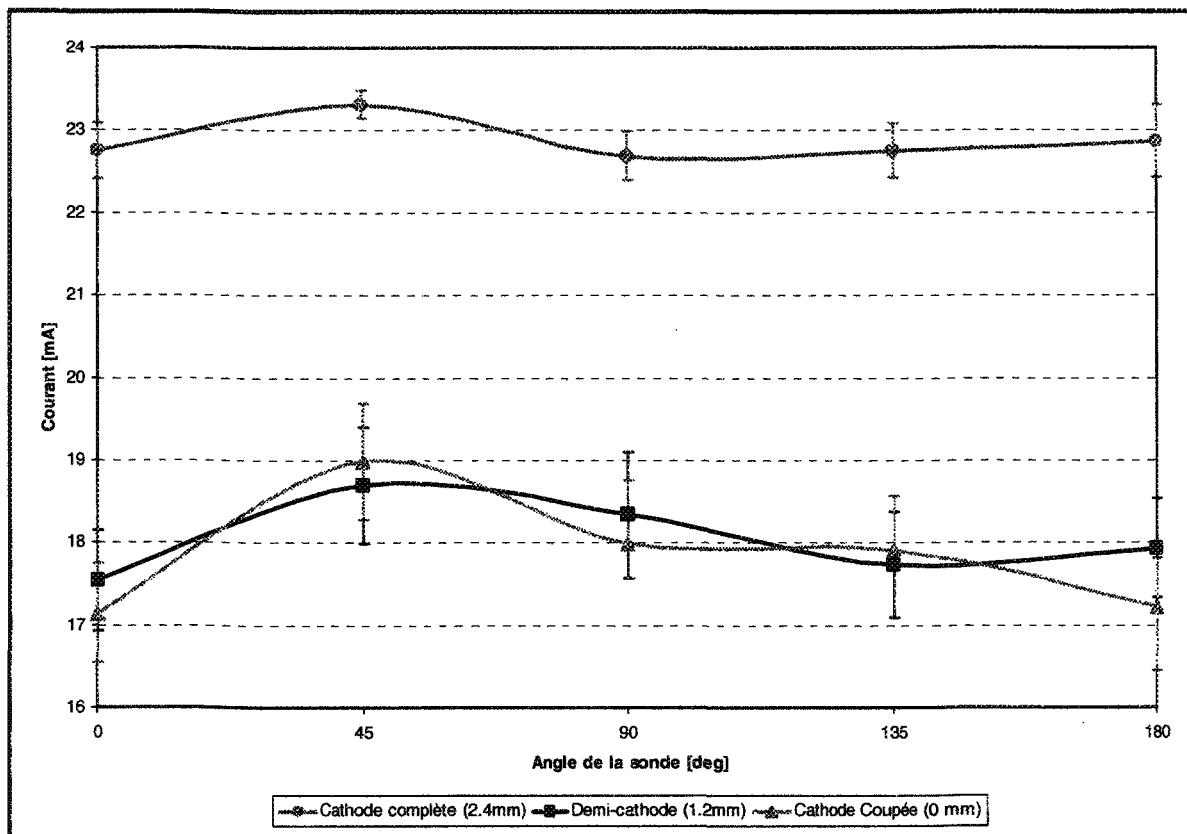


Figure 6.10 Courant de la sonde sphérique mesuré pour trois longueurs de cathode en fonction de l'angle de la sonde par rapport à l'écoulement

Dans un premier temps, il est possible de constater que le courant de la cellule électrochimique est du même ordre de grandeur avec la demi-cathode ou encore avec la cathode totalement coupée. Cela signifie que pour ces deux cas, l'anode devient l'électrode principale limitant la réaction électrochimique. Le tableau 6.5 suivant montre l'écart entre l'amplitude minimale et maximale mesurée en effectuant la rotation de la sonde dans l'écoulement pour les trois types de cathodes :

	Amplitude moyenne du courant [mA]	Ecart entre le courant maximal et minimal mesuré en effectuant la rotation de la sonde [mA]	Ecart-type moyen [mA]	Taille écart-type / courant min-max
Cathode complète (2.4 mm)	22.88	0.63	0.23	0.36
Demi-cathode (1.2 mm)	18.04	1.15	0.31	0.27
Cathode coupée (0 mm)	17.85	1.84	0.66	0.36

Tableau 6.5 Courant de la sonde sphérique en fonction de différentes longueurs de cathode

Malgré le fait que la cathode complète génère un courant supérieur, l'écart entre le courant minimal et maximal mesuré pour cette configuration est inférieur aux deux autres cas étudiés. Toutefois, le ratio écart-type / courant min-max nous démontre que l'écart-type relatif des mesures demeure approximativement constant. Ainsi, la capacité de discriminer l'orientation de l'écoulement par rapport à la position de la cellule électrochimique sur la sonde ne donne pas de meilleurs résultats avec une cathode coupée complètement, bien que la grandeur entre le courant minimum et maximum mesuré pour ce cas soit plus grande. Cette expérimentation a toutefois permis de démontrer qu'une diminution de la taille de la cathode accentuait l'écart d'amplitude des courants minimaux et maximaux mesurés, malgré une augmentation de l'écart-type moyen et une diminution du courant total. Cette augmentation de l'écart-type moyen indique que les instabilités sont plus importantes lorsque la dimension de la cathode en saillie par rapport à la surface de la sphère diminue.

À partir des résultats obtenus, la sonde sphérique ne semble pas appropriée à la détermination de la direction de l'écoulement. Il a été impossible d'obtenir des mesures suffisamment précises de courant pour être en mesure de calculer avec une précision acceptable l'orientation de la sonde électrochimique par rapport à l'écoulement. Pour cette raison, un nouveau type de sonde a été envisagé.

6.4.3- Utilisation d'un cylindre

Le concept du cylindre a été envisagé pour différentes raisons. La forme géométrique du cylindre possède plusieurs avantages :

- le débit dans un cylindre comporte une forte variation selon l'angle qu'il a par rapport à l'écoulement dans lequel il est immergé. Lorsque l'axe du cylindre est colinéaire à l'écoulement du fluide, la vitesse du liquide à l'intérieur du cylindre sera semblable à la vitesse même de l'écoulement. Toutefois, elle sera pratiquement nulle lorsque le cylindre se trouve perpendiculaire au sens de déplacement.
- *Perron* [4, 5] a employé un tuyau afin de calibrer les électrodes utilisées pour ses travaux. L'utilisation du cylindre permettra de reproduire la configuration d'électrodes qu'il a employées. Ainsi, il serait possible de récupérer les bases de données de ses travaux caractérisant le courant mesuré aux électrodes en fonction de la vitesse de l'écoulement, de la température, de la concentration de NaOH, du rapport alumine/caustique de même que de la causticité.

- du point de vue pratique, l'usinage d'une sonde cylindrique comportera moins de difficultés techniques que celui de la sonde sphérique.
- l'écart entre le courant minimal et maximal mesuré devrait être beaucoup plus grand que celui obtenu à l'aide de la sonde sphérique. En effet, la variation de vitesse mesurée sur la sphère était minime puisque l'on mesurait les variations de vitesse présente sur la couche hydrodynamique entourant la sonde et non pas une variation de la vitesse de l'écoulement proprement dite.

6.4.3.1- Description du montage

Le montage est constitué d'un cylindre non conducteur en polymère translucide d'un diamètre de 190 mm et d'une longueur de 70 mm. Les extrémités du cylindre ont été amincies afin de réduire l'épaisseur de la paroi à cet endroit. Une paire d'électrodes identiques à celles employées par Perron [4, 5, 6] a été installée au centre du cylindre. La cellule électrochimique est composée de deux électrodes de platine de 0.5 mm de diamètre et 1.3 mm de longueur placées face-à-face au centre du cylindre. Un espacement de 2.5 mm sépare les extrémités les plus rapprochées des électrodes. Deux gaines de plastiques sont utilisées afin de placer les électrodes au centre du cylindre. La figure 6.11 montre la sonde cylindrique :

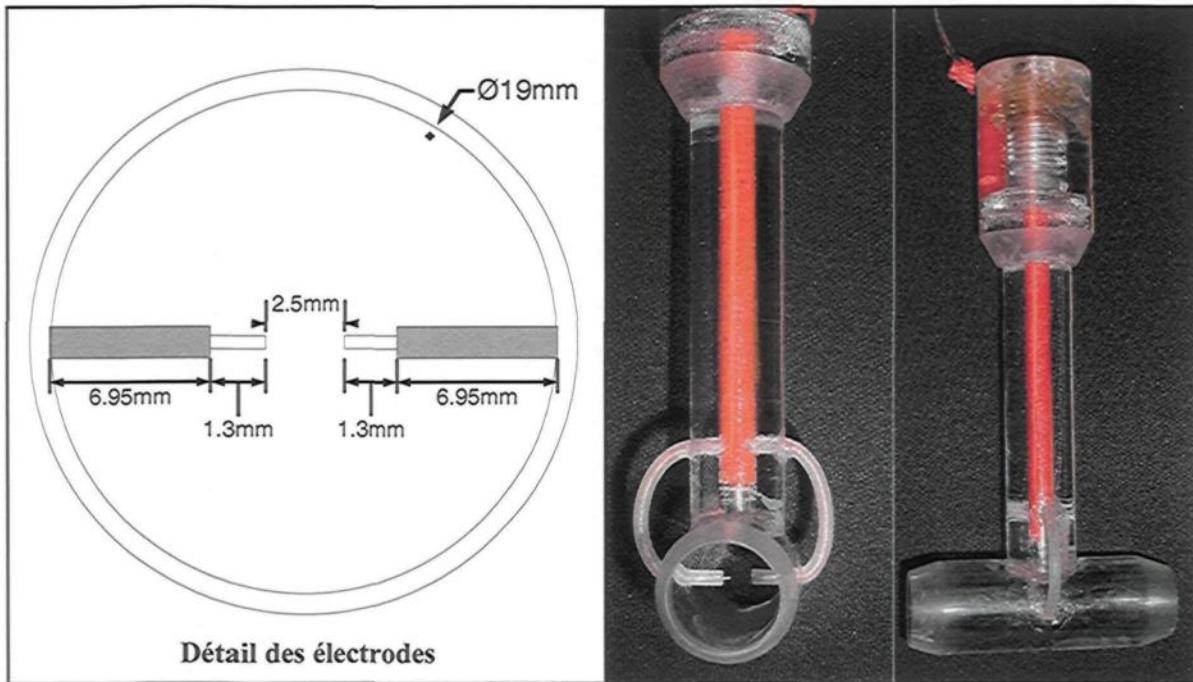


Figure 6.11 Sonde cylindrique

6.4.3.2- Détermination de la tension d'opération de la sonde cylindrique

La configuration des électrodes utilisées pour la sonde cylindrique respectent parfaitement les dimensions définies par Perron [4, 5, 6] dans ses travaux. Ainsi, la tension d'opération qui est employée avec la sonde cylindrique est la même que celle qu'il a utilisée. Ce dernier a déterminé la tension d'opération de la cellule électrochimique pour cette configuration, avec de la liqueur Bayer au repos et en effectuant des mesures pour différentes concentrations. Ses expérimentations ont montré qu'en-dessous de 3 volts, aucun courant de l'ordre du mA n'est significatif. Au-dessus de 7 volts, les courants deviennent excessifs. Pour des solutions de liqueur Bayer diluées ($[NaOH] < 40 \text{ g/L}$), il a

observé que le courant augmente avec la concentration de NaOH et la tension appliquée. À haute concentration de NaOH, le courant augmente seulement avec la tension appliquée. Puisqu'il est nécessaire de travailler avec une tension qui produit un courant facilement mesurable sans qu'il devienne excessif à température et vitesse élevée, il a été déterminé pour ces raisons et d'autres considérations pratiques que la tension d'opération serait de 6 volts.

6.4.3.3- Définition de l'angle de mesure

Au cours des tests qui seront décrits dans les sections suivantes, la sonde cylindrique est déplacée dans l'écoulement selon différents angles. Cet angle est celui que fait l'axe du cylindre par rapport à la direction de l'écoulement. Le cylindre est toujours positionné selon le plan horizontal et effectue une rotation autour de l'axe vertical. Un angle de 0 degré correspond à un écoulement coaxial. L'angle de 90 degrés correspond à un écoulement perpendiculaire à l'axe du cylindre. Dans ce cas, le fluide percute la paroi extérieure du cylindre. La figure 6.12 présente les diagrammes d'écoulement correspondants.

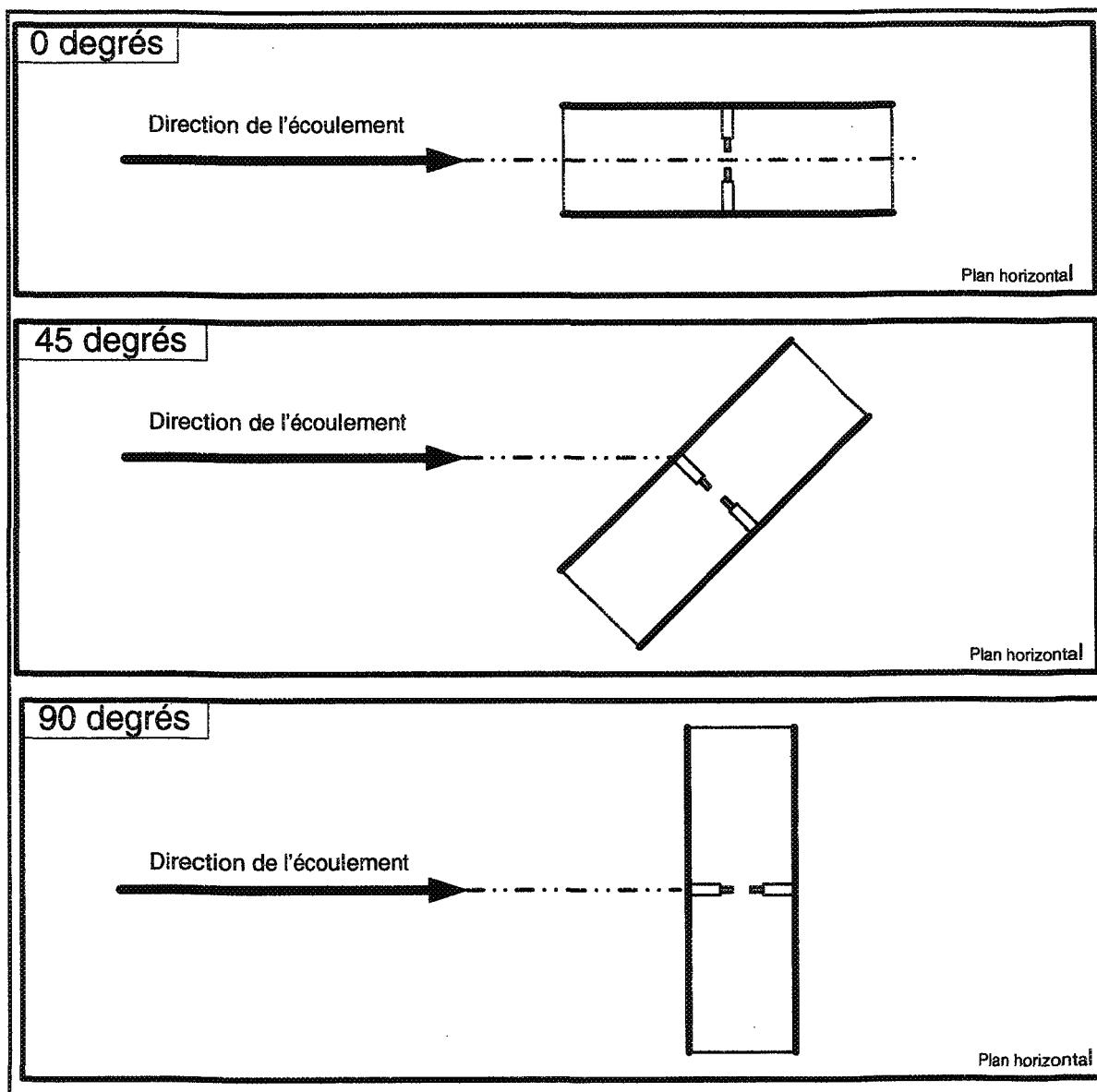


Figure 6.12 Angle de la sonde par rapport à l'écoulement sur un plan horizontal

6.4.3.4- Effet de la variation de l'angle de l'écoulement sur la sonde cylindrique

Dans le but de caractériser la sonde cylindrique, une série de tests a été effectuée afin de mesurer le courant de la cellule électrochimique en fonction de l'orientation de

l'écoulement par rapport à la sonde. Pour réaliser ces tests, la sonde a été fixée au chariot du banc d'essai. Elle a été immergée dans une solution de NaOH à une concentration de 50 g/L. La solution était à la température de la pièce. Les tests ont été effectués à différentes vitesses. Au début et à la fin de chaque groupe de tests, une moyenne du courant ($I_{moyen\ zero\ debut}$ et $I_{moyen\ zero\ fin}$) a été effectuée à vitesse nulle. Cette mesure a été effectuée dans le but de compenser pour les légères variations de température de l'électrolyte de même que la dérive de la tension de la source. La compensation s'effectue de la façon suivante :

$$I_{compensé} = \frac{I_{moyen\ zero\ fin}}{I_{moyen\ zero\ debut}} I_{données\ brutes} \quad (6.1)$$

La figure 6.13 présente le résultat des mesures compensées :

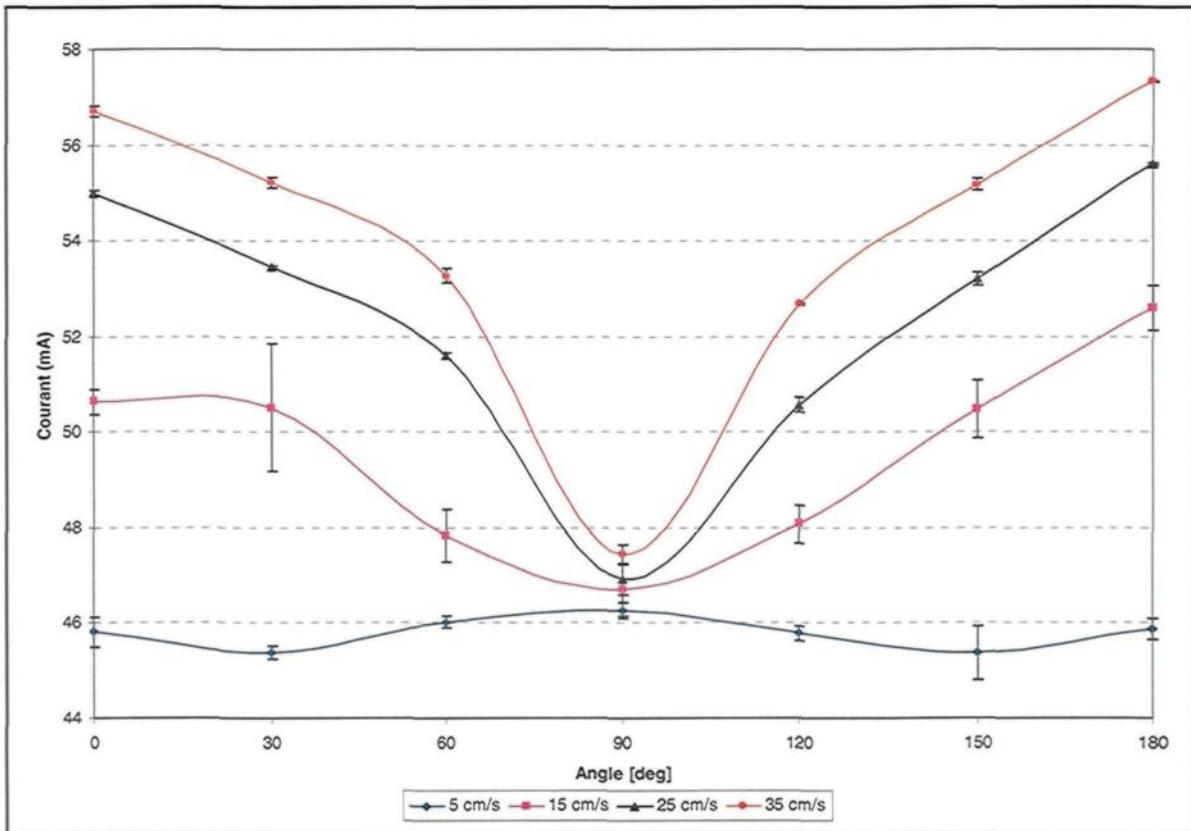


Figure 6.13 Courant de la sonde cylindrique en fonction de son orientation par rapport à l'écoulement

Les résultats obtenus démontrent une augmentation du courant en fonction de la vitesse de l'écoulement tel que prévu. Les courants mesurés sont maximaux pour des écoulements coaxiaux au cylindre (0 et 180 degrés). Ils sont minimaux lorsque l'axe du cylindre est perpendiculaire à l'écoulement (90 degrés). Les courants affichent le même type de profil pour les vitesses égales ou supérieures à 15 cm/s. À 5 cm/s, il semble que la vitesse de l'écoulement aux électrodes est inférieure au régime de convection naturelle près de la surface des électrodes causé par les bulles entraînées par la poussée d'Archimède

(*Perron* [4]). Ainsi, les mesures prises dans ces conditions rendent la vitesse de l'écoulement indétectable.

L'amplitude du phénomène mesuré grâce à la sonde cylindrique est plus grande que celle de la sonde sphérique. En effet, à titre d'exemple, la variation entre le courant minimal et maximal mesuré à 15 cm/s est de 4.9 mA avec un écart-type moyen de 0.6 mA. Dans ce cas, le ratio écart-type / courant min-max est de 0.12 ce qui constitue amélioration considérable sur la sonde sphérique. Plus la vitesse de l'écoulement augmente, plus l'écart entre le courant minimal et maximal est grand. De plus, l'écart-type tend à diminuer. Ainsi, le ratio écart-type / courant min-max diminue lorsque la vitesse augmente. Cette méthode s'avère donc efficace pour déterminer l'axe de l'écoulement dans le cas où l'amplitude de la vitesse de cet écoulement est connue. Une façon de déterminer cette amplitude est d'employer la méthode de mesure de la grandeur de la vitesse développée par *Perron* [4, 5, 6]. Dans le cas où la grandeur de la vitesse demeure inconnue, il est nécessaire d'effectuer une rotation de la sonde cylindrique dans le but de maximiser ou minimiser le courant mesuré. Ce dernier sera maximal à 0 ou 180 degrés et minimal à 90 degrés.

Les profils de courant obtenus avec la sonde cylindrique sont symétriques. Il est impossible de faire la distinction entre l'écoulement provenant de l'avant du cylindre (0 degrés) et celui provenant de l'arrière (180 degrés). Pour cette raison, il devient nécessaire

d'effectuer des modifications au montage expérimental dans le but d'être en mesure de différencier le sens de l'écoulement.

6.4.4- Utilisation d'une restriction couplée au cylindre

6.4.4.1- Description du montage

Pour mettre en évidence le sens de l'écoulement, une restriction a été ajoutée à la sonde cylindrique. Le rôle de cette pièce est de créer une résistance hydrodynamique lorsque le fluide pénètre par le côté du cylindre sans restriction. La restriction est composée d'un cylindre de téflon d'une longueur totale de 30 mm et d'un diamètre de 19 mm. Le diamètre du cylindre est de 7.9 mm à l'entrée de la restriction et 19 mm à la sortie. Il est inséré de 23 mm à l'intérieur de la sonde cylindrique et est retenu par friction. Le diamètre extérieur augmente de 7.9 à 19 mm sur une longueur de 7 mm tandis que le diamètre intérieur augmente de 7.9 à 19 mm sur une longueur de 23 mm. La figure 6.14 présente un schéma de la restriction employée avec la sonde cylindrique :

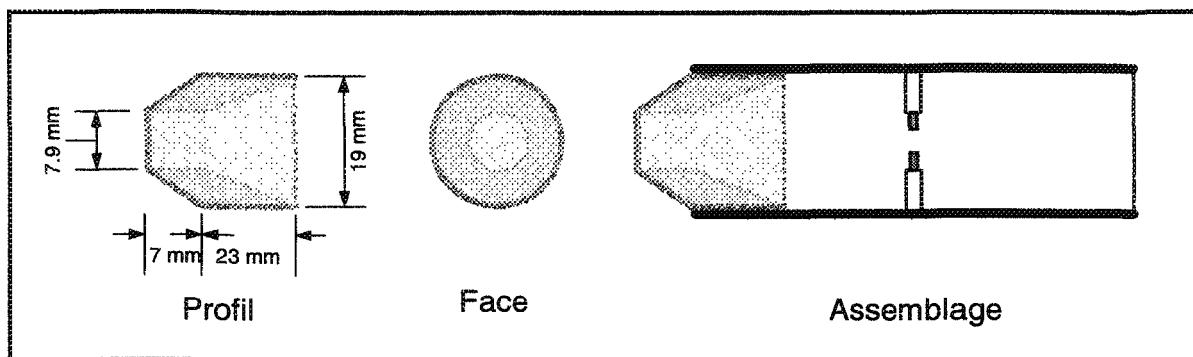


Figure 6.14 Restriction employée avec la sonde cylindrique.

6.4.4.3- Définition de l'angle de mesure

Au cours des tests décrits dans les sections suivantes, la sonde cylindrique avec restriction est déplacée dans l'écoulement selon différentes orientations. Cette orientation est déterminée par l'angle que fait l'axe du cylindre par rapport à la direction de l'écoulement. Le cylindre est toujours positionné dans le plan horizontal et effectue une rotation autour d'un l'axe vertical. Un angle de 0 degré correspond à un écoulement coaxial à travers le cylindre incident du côté de la restriction. L'angle de 90 degrés correspond à l'orientation où le cylindre est perpendiculaire à l'écoulement. Dans ce cas, le fluide contournera la surface extérieure du cylindre. Finalement, l'angle de 180 degrés correspond à un écoulement coaxial émergeant du coté de la restriction. La figure 6.15 présente les diagrammes d'écoulement correspondants.

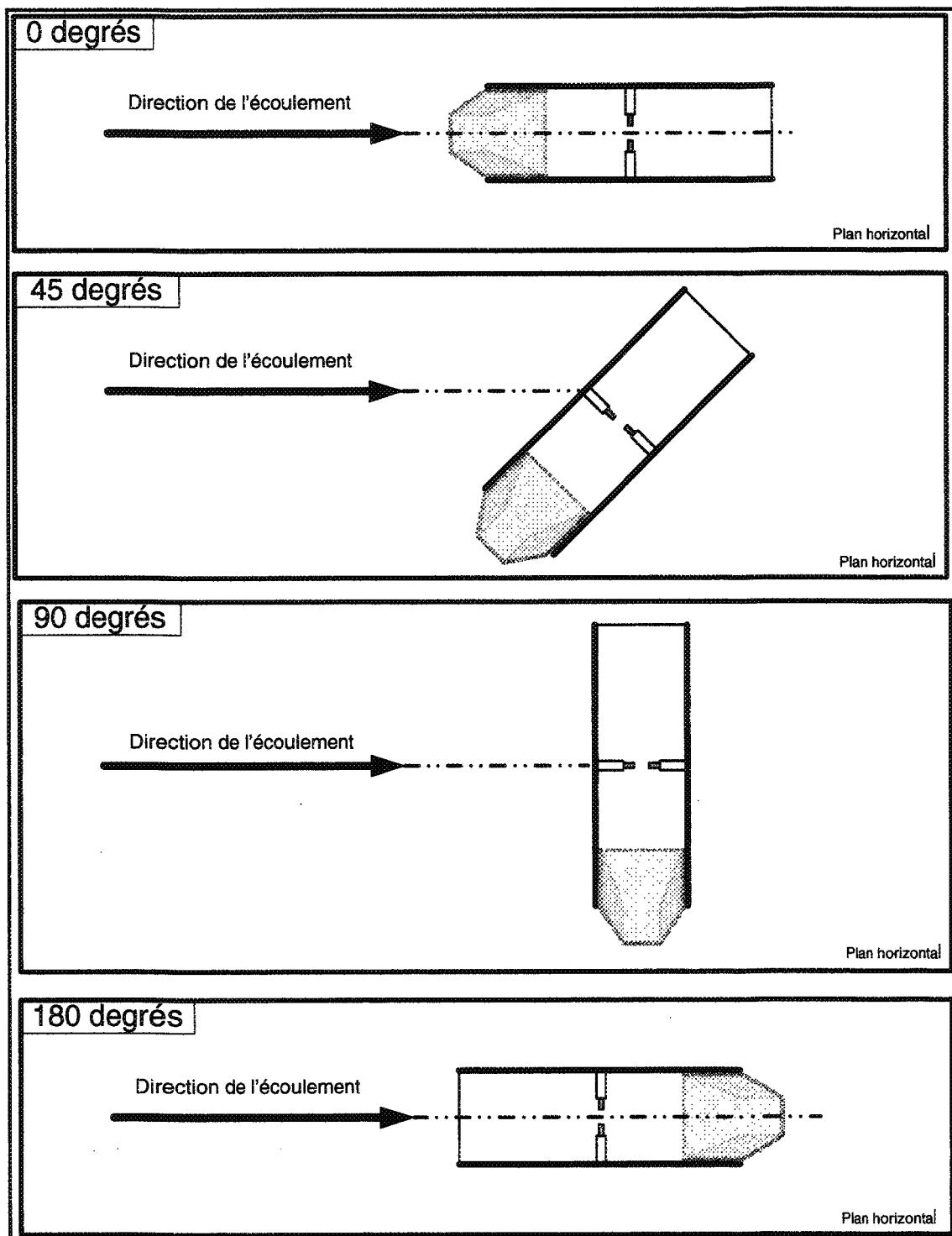


Figure 6.15 Angle de la sonde avec restriction par rapport à l'écoulement sur un plan horizontal

6.4.4.4- Effet de la variation de l'orientation de l'écoulement sur la sonde cylindrique avec restriction

Dans le but de caractériser la sonde cylindrique avec restriction, une série de tests a été effectuée afin de mesurer le courant de la cellule électrochimique en fonction de l'orientation de l'écoulement sur la sonde avec les mêmes conditions expérimentales que celles employées avec le cylindre sans restriction. Ainsi, la sonde a été immergée dans une solution de NaOH à une concentration de 50 g/L à température de la pièce. Au début de chaque test, une moyenne du courant a été effectuée à vitesse nulle dans le but de compenser pour les légères variations de température de l'électrolyte de même que la dérive de la tension de la source. La figure 6.16 présente le résultat des mesures compensées.

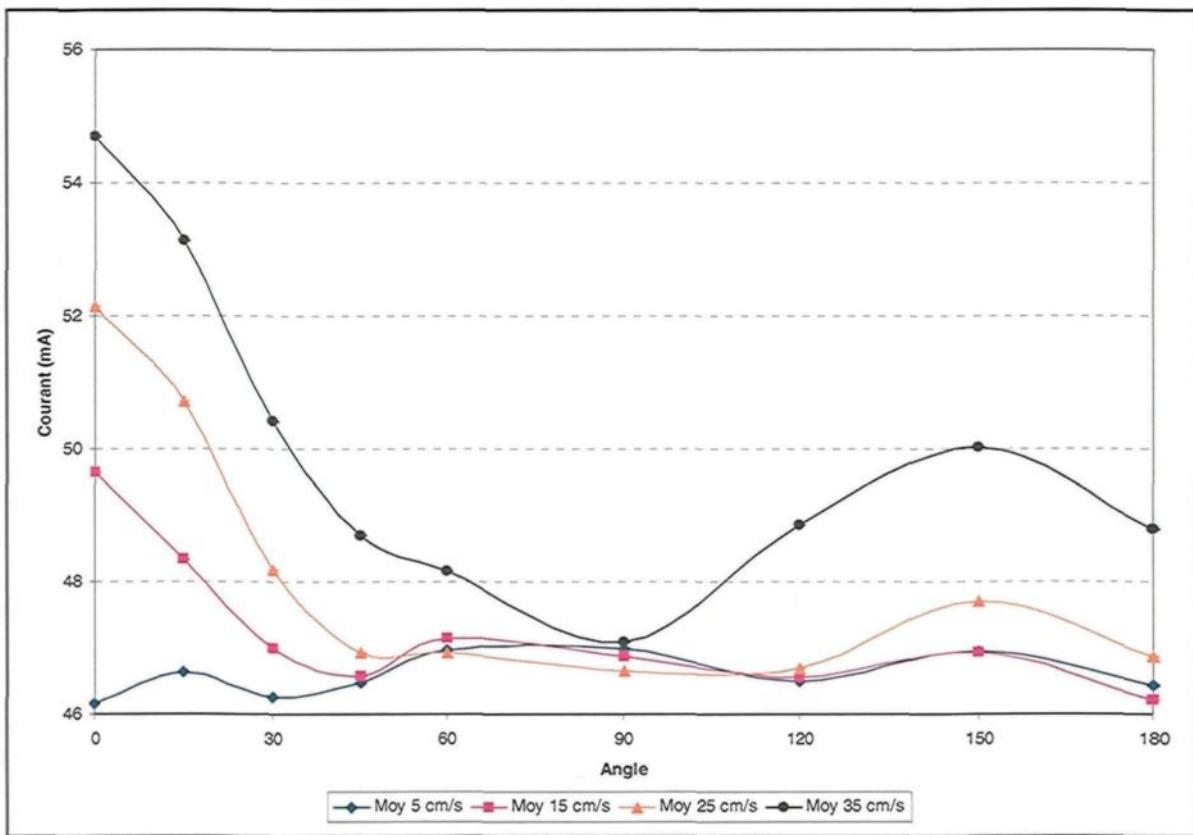


Figure 6.16 Courant de la sonde cylindrique avec restriction en fonction de son orientation par rapport à l'écoulement

Les résultats obtenus démontrent une augmentation du courant en fonction de la vitesse de l'écoulement tel que attendu. Les courants mesurés sont maximaux pour le cas où la restriction du cylindre se trouve face à l'écoulement (0 degré). Ils sont minimaux lorsque l'axe du cylindre est perpendiculaire à l'écoulement (90 degrés). Un maximum local est finalement présent à 150 degrés. Les courants affichent le même type de profil pour les vitesses égales ou supérieures à 15 cm/s. À 5 cm/s, il semble que la vitesse de l'écoulement aux électrodes est inférieure au régime de convection naturelle près de la surface des électrodes causé par les bulles entraînées par la poussée d'Archimède. Ainsi, les mesures prises dans ces conditions rendent la vitesse de l'écoulement indétectable.

La résistance hydrodynamique qu'offre la restriction au fluide modifie l'écoulement autour des électrodes. Ainsi, les courants maximaux en présence de la restriction sont légèrement inférieurs à ceux sans la restriction. Une observation visuelle permet de constater que les bulles de gaz montent au sommet du cylindre et ont de la difficulté à sortir lorsque l'électrolyte pénètre à l'intérieur du cylindre par le côté inverse à la restriction. Ainsi, la résistance hydrodynamique du cylindre avec restriction est suffisamment grande pour que la majorité du fluide contourne le cylindre au lieu de pénétrer à l'intérieur dans ce cas. La vitesse du fluide pénétrant le cylindre serait donc assez faible ce qui expliquerait pourquoi les bulles de gaz semblent être stagnantes à l'intérieur de la sonde. En contrepartie, les bulles de gaz s'évacuent facilement de la sonde lorsque le fluide entre à l'intérieur de la sonde du côté de la restriction. Cette observation est confirmée par le courant mesuré à l'aide de la paire d'électrodes.

Dans le cas où la vitesse du fluide serait connue, il serait possible grâce à ce montage de déterminer la direction de l'écoulement à l'intérieur d'une fenêtre de ± 30 degrés autour de ce dernier. En effet, le maximum local mesuré à 150 degrés demeure toujours inférieur au courant mesuré entre 0 et 30 degrés. Ainsi, le courant à l'intérieur de cette fenêtre est nécessairement un maximum absolu. Il est par conséquent possible de déterminer l'orientation de l'écoulement dans ce cas précis. Toutefois les travaux de recherche seront employés dans un milieu où la vitesse de l'électrolyte est inconnue. Il est donc envisagé

d'effectuer la rotation de la sonde durant la mesure dans le but de maximiser le courant. Une fois le courant maximal trouvé, la direction de l'écoulement serait connue.

6.4.4.5- Effet d'une variation de l'orientation verticale de l'écoulement sur la sonde cylindrique avec restriction

Jusqu'à maintenant, les montages expérimentaux ont été testés dans le plan horizontal. Pour connaître l'effet d'une variation de l'orientation verticale sur le courant de la cellule électrochimique, des expérimentations ont été effectuées à l'aide du banc d'essai. La figure 6.17 présente le référentiel utilisé pour définir les angles employés pour ces expérimentations.

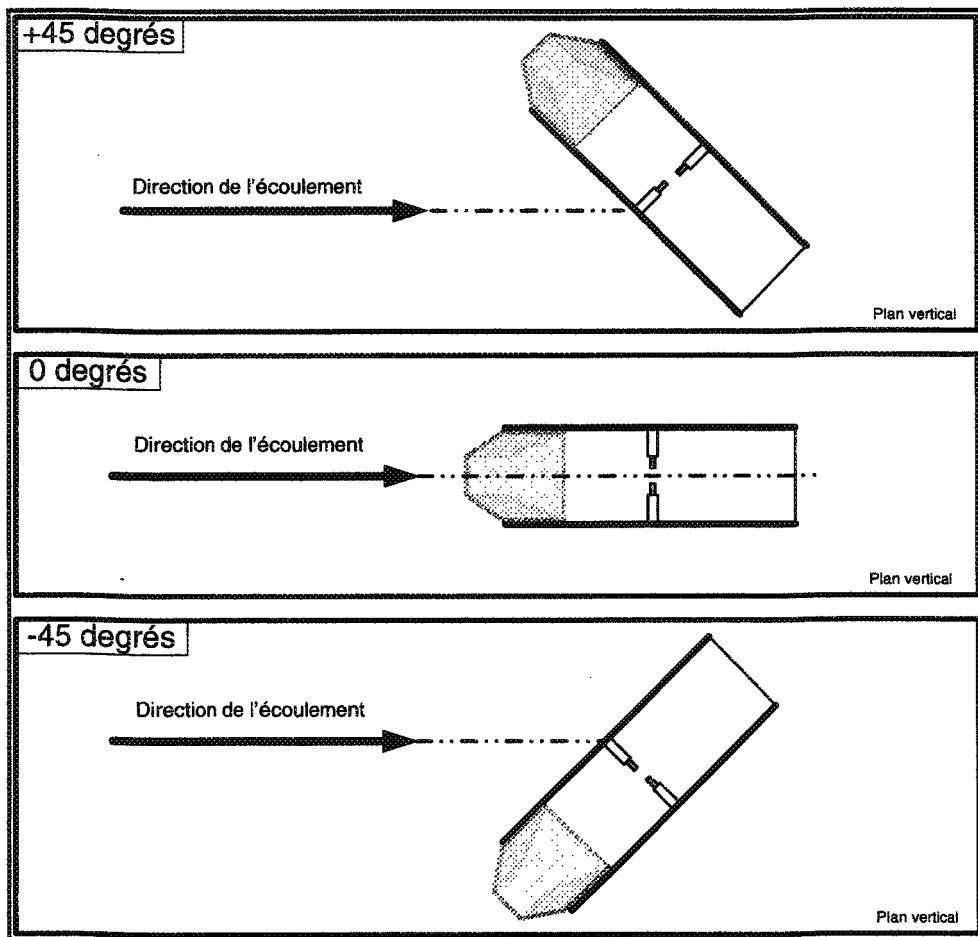


Figure 6.17 Angle de la sonde avec restriction par rapport à l'écoulement sur un plan vertical

Il est important de noter que les tests qui suivent ont eu lieu en effectuant la rotation de la sonde dans le plan vertical. Toutefois, l'écoulement demeure toujours dans le plan horizontal puisqu'il est impossible de créer un écoulement comportant une composante de vitesse verticale avec le bassin dont nous disposons en laboratoire.

Les tests qui suivent ont été effectués avec une solution de NaOH à une concentration de 50 g/L à température de la pièce. Au début de chaque test, une moyenne du courant a été effectuée à vitesse nulle dans le but de compenser pour les légères

variations de température de l'électrolyte de même que la dérive de la tension de la source. La sonde cylindrique avec restriction a été inclinée à la verticale selon différents angles. Le courant de la cellule électrochimique a été mesuré pour différentes vitesses. Deux cas ont été étudiés : la figure 6.18 présente les résultats lorsque la restriction du cylindre se trouve face à l'écoulement (0 degré) et la figure 6.19 présente les résultats lorsque la restriction du cylindre se trouve en sens opposé à l'écoulement (180 degrés).

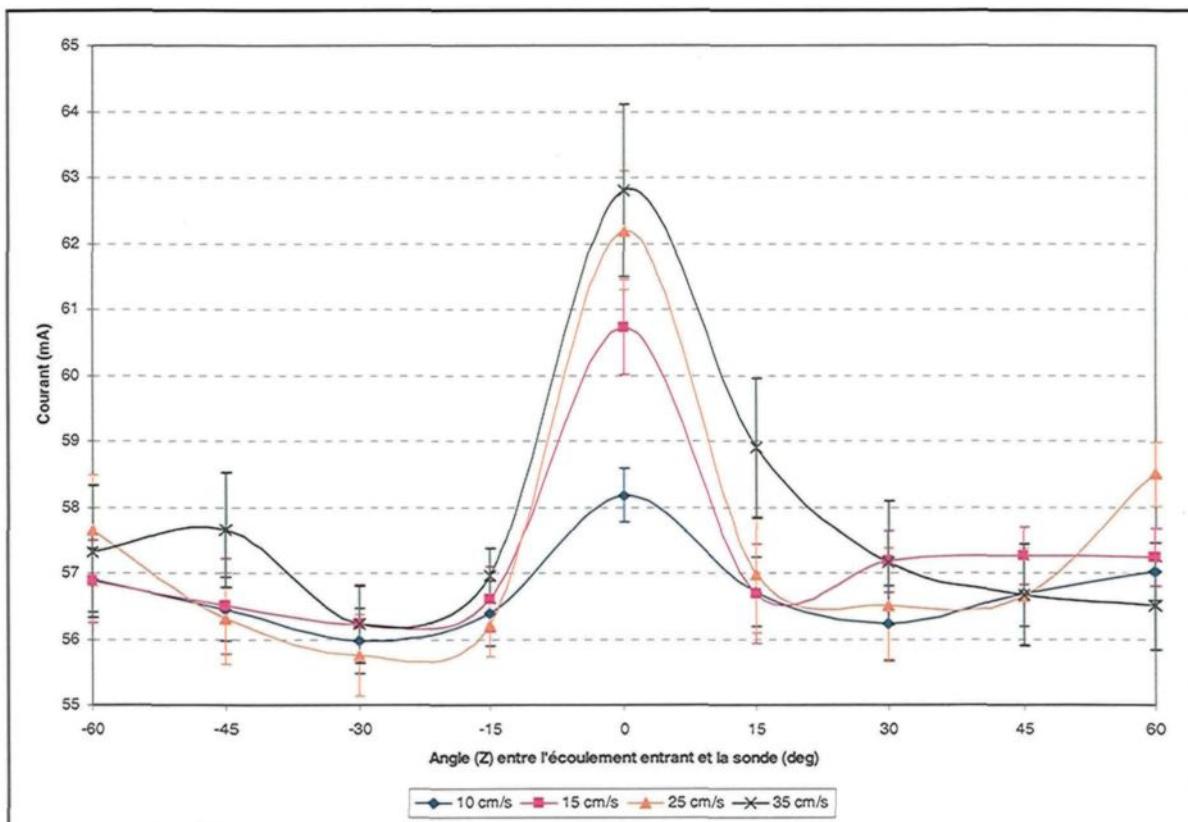


Figure 6.18 Courant de la sonde cylindrique avec restriction face à l'écoulement (0 degré) en fonction de l'orientation de la sonde sur un plan vertical

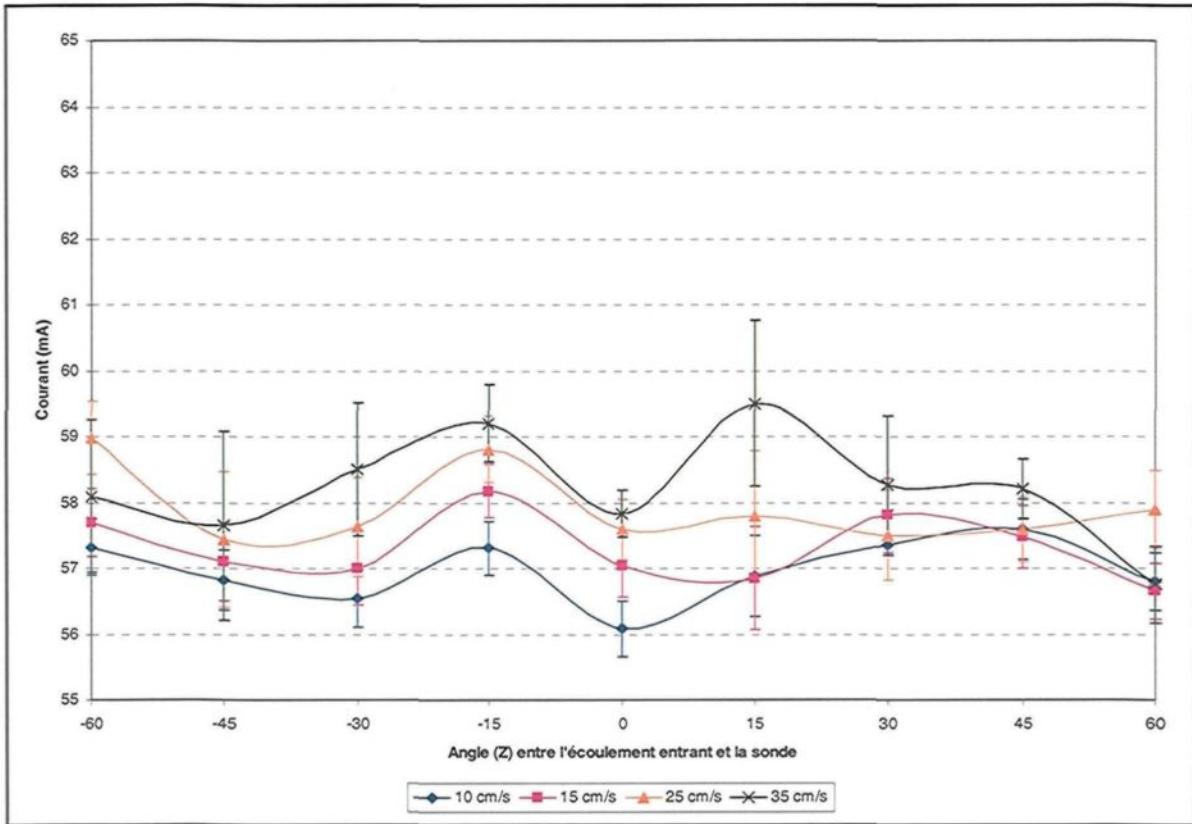


Figure 6.19 Courant de la sonde cylindrique avec restriction en sens opposé à l'écoulement (180 degrés) en fonction de l'orientation de la sonde sur un plan vertical

Il est tout d'abord important de spécifier qu'il faut interpréter avec prudence ces résultats comme étant le comportement de la sonde dans un écoulement possédant réellement une composante verticale. En effet, comme il a été mentionné précédemment, c'est la sonde qui a été déplacée sur le plan vertical et non l'écoulement. Toutefois, il est possible d'observer les tendances qui ressortent de ces tests.

On constate que la fenêtre de détection de la sonde est très restreinte sur l'axe vertical. En effet il devient impossible de discriminer toute valeur au-delà de 15 degrés d'écart entre la sonde et l'écoulement. On retrouve toutefois le même type de profil de

courant que ceux obtenus à l'horizontal. Lorsque l'écoulement est coaxial au cylindre et incident à la restriction, le courant est maximal. Par la suite, il décroît et oscille entre 88 et 93 % de sa valeur maximale. L'écart-type entre les résultats obtenus lorsque la sonde est inclinée verticalement est supérieur au cas où la sonde est testée sur le plan horizontal. Il a été observé que le montage expérimental est plus sensible aux vibrations lorsque la sonde cylindrique avec restriction est testée avec variation de l'angle vertical. Malgré une plus forte variabilité dans les résultats mesurés à la verticale, il en ressort qu'un maximum est présent lorsque l'écoulement est parallèle à la sonde. Ce maximum est absolu par rapport au courant mesuré pour tout autre angle que peut faire le cylindre par rapport à l'écoulement.

La caractérisation du cylindre avec restriction a démontré que cette méthode pourrait être utilisée dans le but de développer un appareil de mesure transportable à l'intérieur d'un milieu industriel. En effet, il a été établi que le courant mesuré par la cellule électrochimique est maximal lorsque l'écoulement est parallèle à l'axe de la sonde et qu'il est incident à la restriction. Ainsi, un appareil permettant la maximisation du courant de la cellule électrochimique sur les plans horizontal et vertical permettrait de déterminer la direction d'un écoulement ouvert.

CHAPITRE 7

APPLICATION DE LA MÉTHODE

Au chapitre précédent, il a été démontré que le courant de la cellule électrochimique d'un cylindre avec restriction variait en fonction de l'orientation du cylindre par rapport à l'écoulement. L'amplitude du courant mesuré est maximale lorsque le fluide entre à l'intérieur du cylindre par la restriction. Ainsi, ce type de sonde permettrait de déterminer l'orientation du fluide en maximisant le courant mesuré. L'avantage de cette méthode est qu'aucun étalonnage n'est nécessaire. Plusieurs paramètres affectent la vitesse de la réaction électrochimique. Tel qu'il a été mentionné précédemment, la vitesse de l'écoulement, la température, la concentration de NaOH, la causticité et le ratio alumine caustique sont des facteurs qui influencent les mesures. Toutefois, la recherche du courant maximal à un endroit et à un moment précis a pour effet de fixer dans le temps tous les paramètres. La rotation dans l'espace de la sonde permet de déterminer, à cet instant, l'orientation de la sonde où le courant de la cellule électrochimique est maximal, c'est-à-dire l'orientation où la restriction de la sonde fait face à l'écoulement. Dans le but de valider cette méthode, deux prototypes ont été conçus et sont présentés dans ce chapitre.

7.1- Validation de la méthode en laboratoire

La sonde cylindrique a été étudiée au chapitre précédent pour connaître son comportement en fonction de son orientation dans le fluide en mouvement. Dans le but de ne pas compliquer inutilement le montage mécanique et pour des considérations pratiques, la sonde effectuera uniquement des rotations dans le plan horizontal à l'intérieur du banc d'essai. Un montage expérimental a été assemblé pour permettre à la sonde d'effectuer ces rotations. Ce montage est constitué d'un servomoteur, d'un microcontrôleur régissant les mouvements du moteur, d'un affichage indiquant la vitesse de rotation du servomoteur de même que sa position et finalement d'un clavier numérique permettant de spécifier la vitesse de rotation désirée. La figure 7.1 présente le montage expérimental :

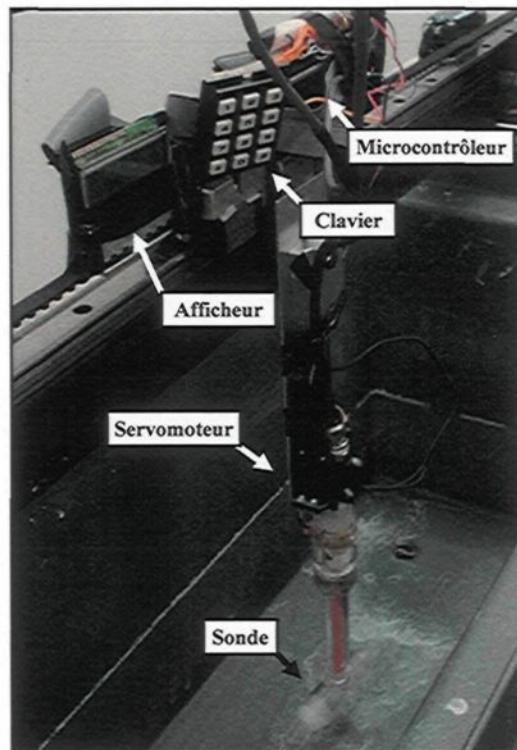


Figure 7.1 Montage expérimental

Des essais ont été effectués à l'aide du banc d'essai. L'électrolyte était composé d'une solution de NaOH à une concentration de 50 g/L et à la température de la pièce. Les tests ont été effectués de la manière suivante. Un observateur surveillait le déplacement de la sonde dans l'écoulement et informait une seconde personne lorsque la restriction du cylindre se trouvait parallèle à la direction de l'écoulement. À ce moment, cette deuxième personne notait sur le logiciel d'acquisition de données l'instant fixé par le premier observateur. La figure 7.2 présente l'enregistrement d'un test effectué à 15 cm/s :

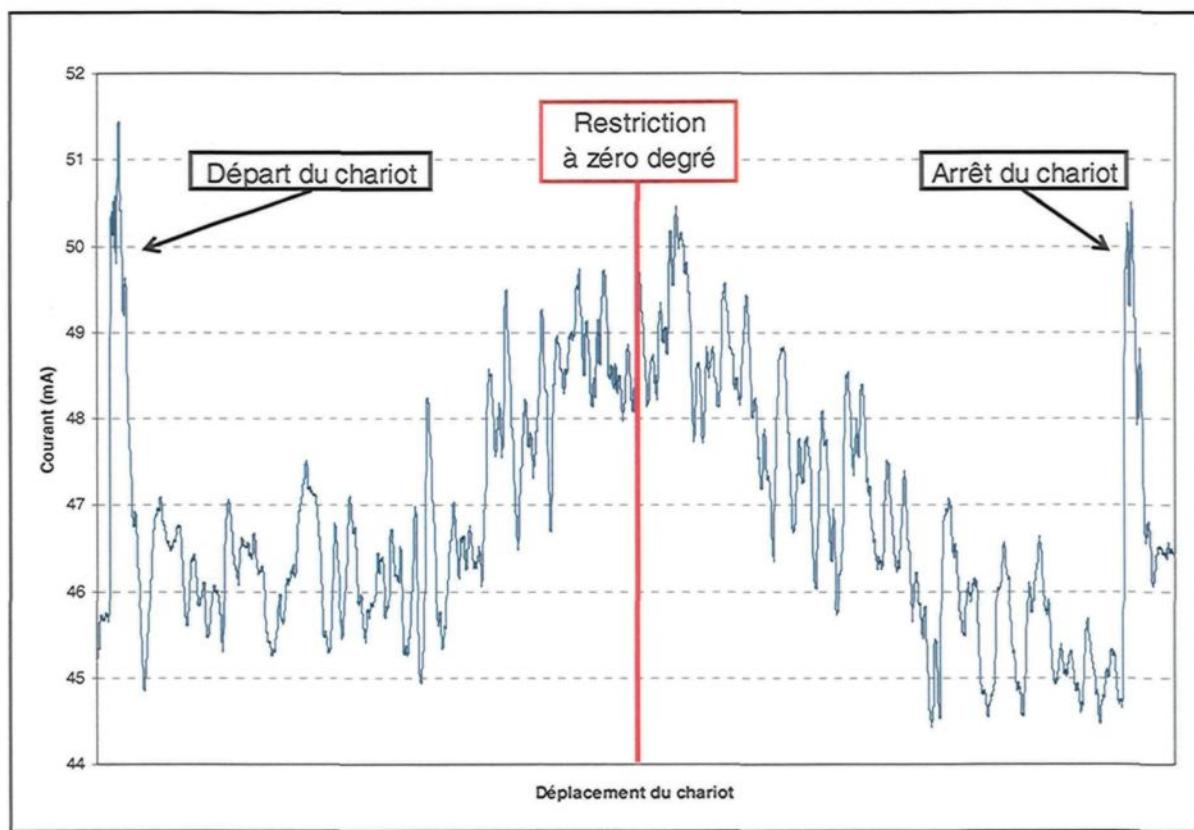


Figure 7.2 Courant vs position de la sonde en rotation

La figure 7.2 comporte différentes caractéristiques. Tout d'abord, un pic de courant est présent au début et à la fin du graphique. Il est causé par le départ et l'arrêt du chariot. Par la suite, le courant se stabilise dans la première partie de l'enregistrement et a la forme d'une cloche dans la partie centrale. Cette cloche est engendrée par la rotation sur le plan horizontale de la sonde effectuée à l'aide du servomoteur. Au départ, l'axe de la sonde n'est pas colinéaire avec l'écoulement relatif du fluide. Le courant mesuré est faible. Par la suite, la rotation de la sonde aligne l'axe de cette dernière avec l'écoulement relatif du fluide. Le courant augmente ainsi graduellement jusqu'au plateau maximal obtenu lorsque l'axe de la sonde est parallèle à l'écoulement relatif du fluide. Finalement, la rotation de la sonde continue et l'alignement de cette dernière est perdu. Le courant diminue graduellement. Bien que partiellement qualitatifs, les résultats présentés à la figure 7.2 démontrent qu'il est possible de déterminer la direction de l'écoulement grâce à la mesure du courant de la cellule électrochimique du cylindre avec restriction. L'instant déterminé par l'observateur de la sonde où la restriction est face à la direction de l'écoulement correspond au centre de la cloche de courant mesuré. On peut ainsi conclure que le centre de la cloche représente la position de la sonde lorsque la restriction fait face au fluide.

7.2- Prototype pour test en usine

7.2.1- Description du prototype

L'objectif de ce projet est de développer une méthode de mesure des composantes de vitesse à l'intérieur d'un électrolyte à force ionique élevée. Il est toutefois intéressant de valider en usine la méthode développée. Pour ce faire, un prototype a été conçu. Ce dernier se compose de deux parties. La première est constituée d'une paire d'électrodes identiques à celles décrites par *Perron* [4, 5, 6]. Cette paire d'électrodes est employée afin de connaître la grandeur de la vitesse de l'écoulement en se référant aux bases de données qui ont été développées pour caractériser ce type de sonde. La seconde partie de l'appareil est constituée de la sonde cylindrique avec restriction. L'orientation de l'écoulement sera déterminée grâce à cette partie. Les deux sondes sont montées sur une structure permettant leur insertion à l'intérieur du puits d'alimentation d'un décanteur. La rotation sur le plan horizontal des deux cellules électrochimique est effectuée manuellement par l'opérateur retenant l'appareil de mesure à l'aide d'une tige. La rotation sur le plan vertical de la sonde cylindrique s'effectue quant à elle à l'aide d'un servomoteur fixé directement sur cette dernière. La figure 7.3 présente le montage mécanique de l'appareil :

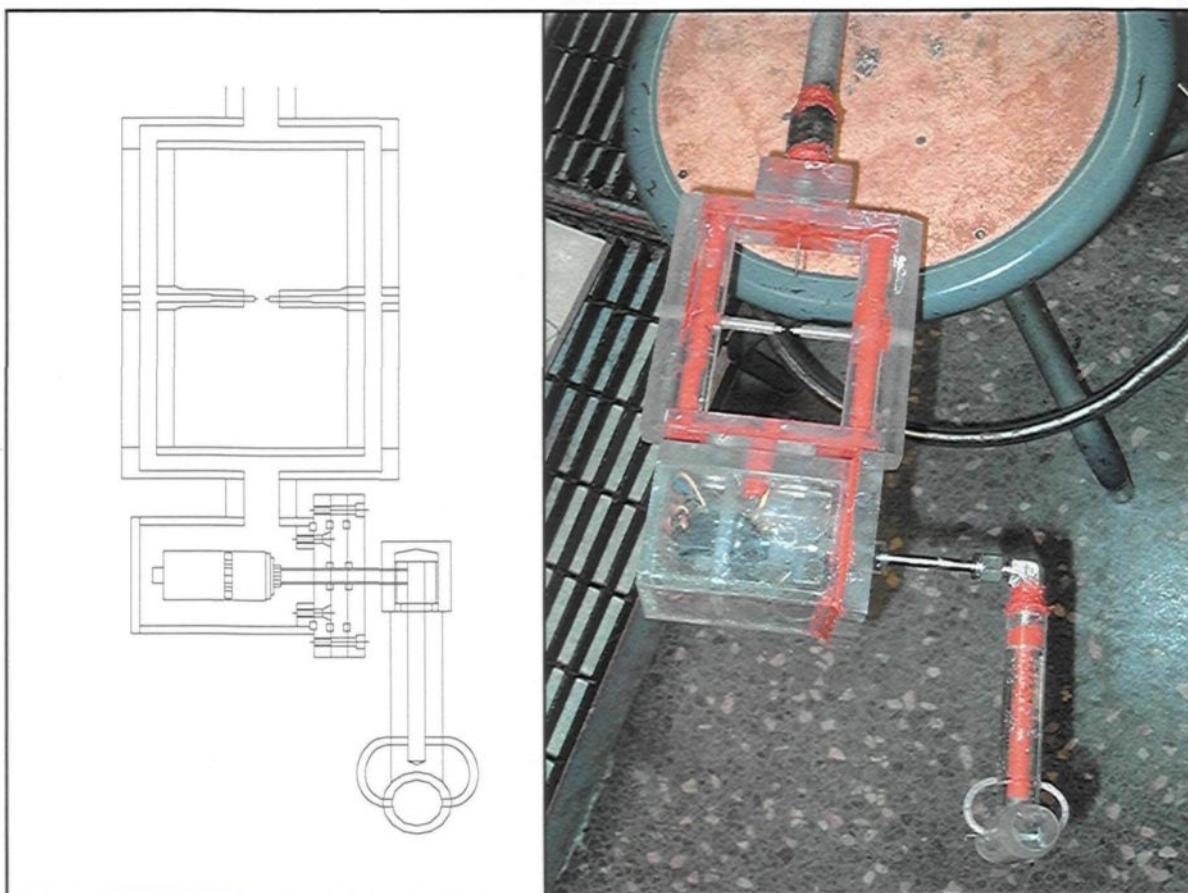


Figure 7.3 Schéma et figure du prototype

La tige sur laquelle est fixé la sonde a 4.5 mètres de longueur. Elle est divisée en trois sections qui sont maintenues grâce à des écrous. Deux thermocouples ont été insérés au niveau de la sonde. Le premier mesure la température du liquide. Le second est fixé à la surface du servomoteur dans le but de s'assurer que la température à laquelle ce dernier opère demeure à l'intérieur d'une plage raisonnable. Un contrôleur a été développé afin d'opérer la sonde. La figure 7.4 présente le panneau de contrôle :

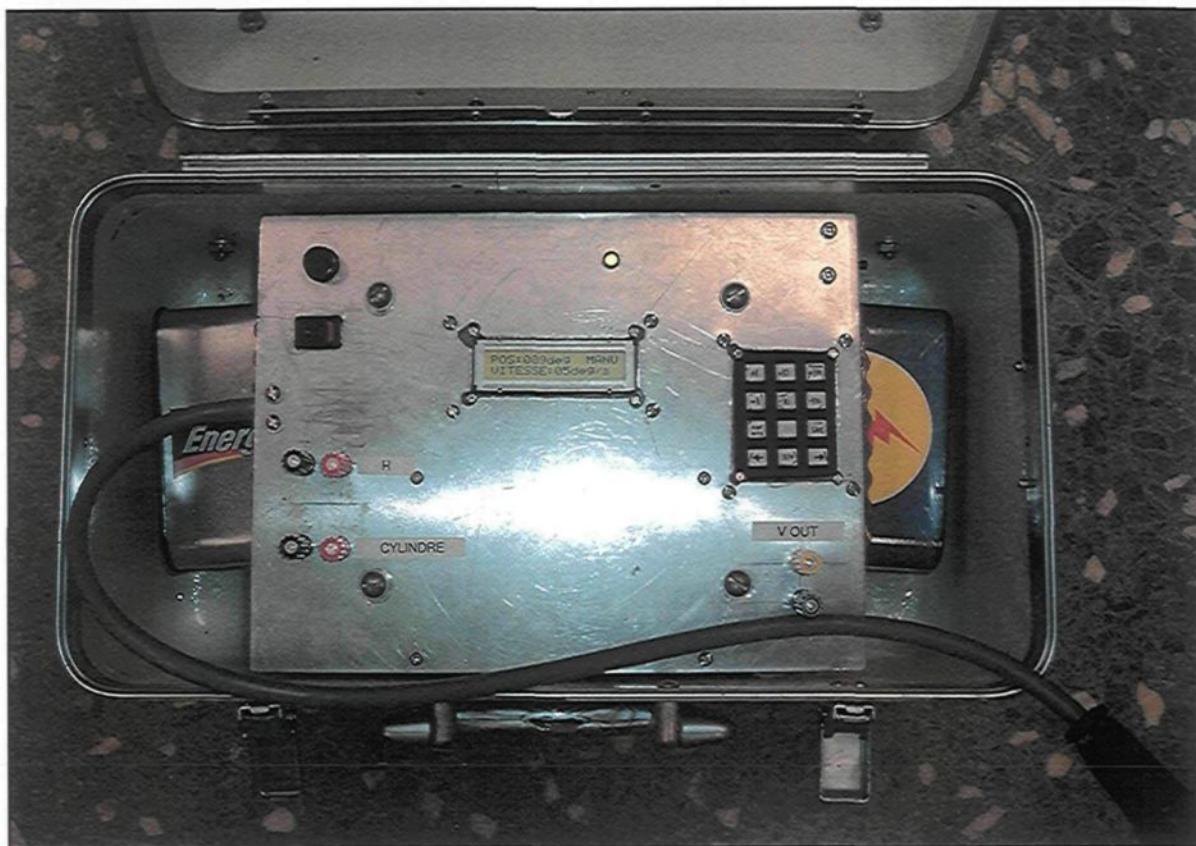


Figure 7.4 Panneau de contrôle de la sonde

Le panneau de contrôle est relié à la sonde à l'aide d'un câble de raccord et il comporte deux parties : l'alimentation des deux sondes électrochimiques et le contrôle de la rotation de la sonde cylindrique dans le plan vertical. Les deux cellules électrochimiques sont alimentées à l'aide d'une source de tension continue indépendante du contrôleur. Le raccord avec les sondes est effectué manuellement en branchant la source sur les terminaux prévus à cette fin sur le panneau. La partie dédiée au contrôle de la rotation de la sonde cylindrique comporte un écran indiquant l'orientation de la sonde, un clavier pour

programmer l'orientation de cette dernière et une sortie 0-5 volts possédant une tension proportionnelle à l'angle de la sonde.

7.2.2- Protocole d'expérimentation en usine

Afin de valider en usine la sonde cylindrique avec restriction, des tests ont été réalisés en deux étapes. Tout d'abord, la sonde permettant de déterminer la grandeur de la vitesse de l'écoulement a été employée. Les travaux de Perron [4, 6] ont montré que cette sonde était influencée par sa position dans l'écoulement. Ainsi, le courant maximal se mesure lorsque sa cellule électrochimique est perpendiculaire à la direction du fluide. Il est donc possible de connaître le plan de l'écoulement de cette manière. La direction dans ce plan demeure toutefois inconnue. Le courant et le plan de l'écoulement ont donc été déterminés grâce à cette sonde.

La seconde partie des expérimentations a consisté à employer la sonde cylindrique avec restriction afin de déterminer la direction du fluide. Une maximisation du courant sur le plan horizontal a été effectuée. Une fois le courant localisé sur le plan horizontal, la sonde a été inclinée verticalement pour déterminer la direction de l'écoulement. La position trouvée a par la suite été comparée avec la direction mesurée à l'aide de l'autre sonde électrochimique pour valider les résultats. La figure suivante présente le matériel utilisé pour le test en usine.

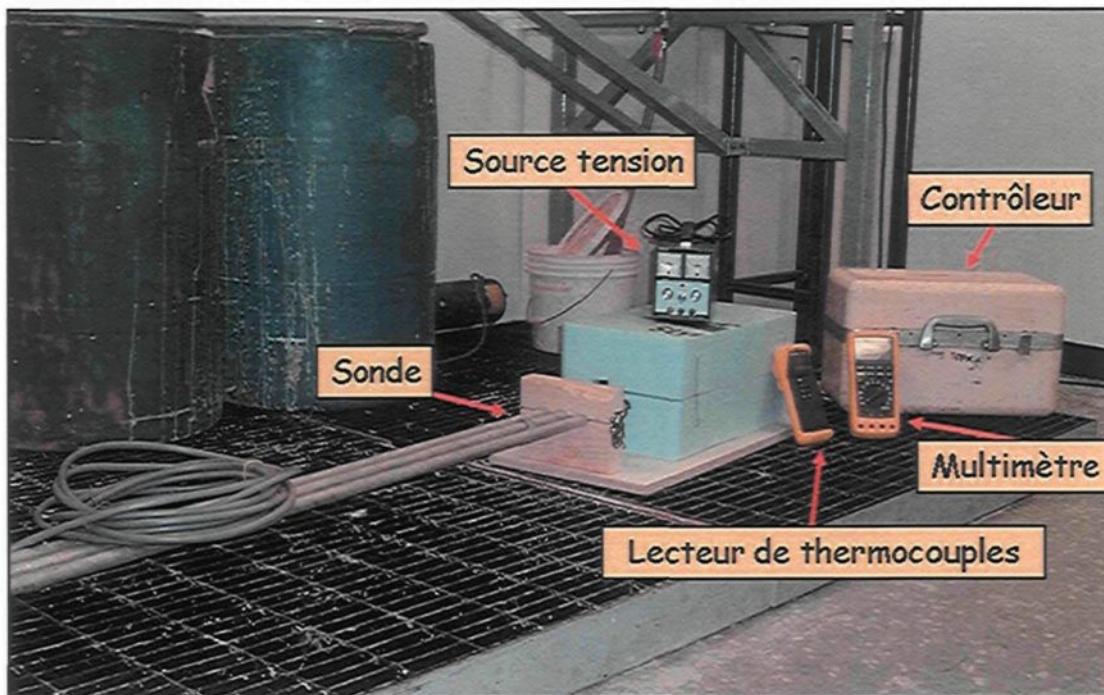


Figure 7.5 Matériel employé pour le test en usine

7.2.3- Essai à l'usine Alcan Vaudreuil de Jonquière

La campagne de mesures s'est effectuée le 25 novembre 2005 à l'usine Vaudreuil de la compagnie Alcan à Jonquière. Les mesures ont été prises dans le décanteur EB1. Ce décanteur comporte un puits d'alimentation décentré, dont l'accès peu encombré facilite l'insertion du prototype. L'accès au puits d'alimentation s'effectue grâce à 5 ouvertures circulaires présentes sur le dessus du décanteur. La caractérisation de la pulpe d'extraction nécessaire pour calculer la grandeur de la vitesse de l'écoulement a été effectuée par une analyse potentiométrique d'un échantillon pris lors de l'expérimentation. Les résultats de cette analyse sont présentés au tableau 7.1.

Paramètre	Valeur
Concentration de NaOH	120.12 g/L
Ratio Alumine/Caustique	0.6200
Causticité	82.1 %

Tableau 7.1 Analyse de la liqueur de EB1

La figure 7.6 représente le puits d'alimentation vu de haut et la figure 7.7 montre les différentes profondeurs où les mesures ont été prises.

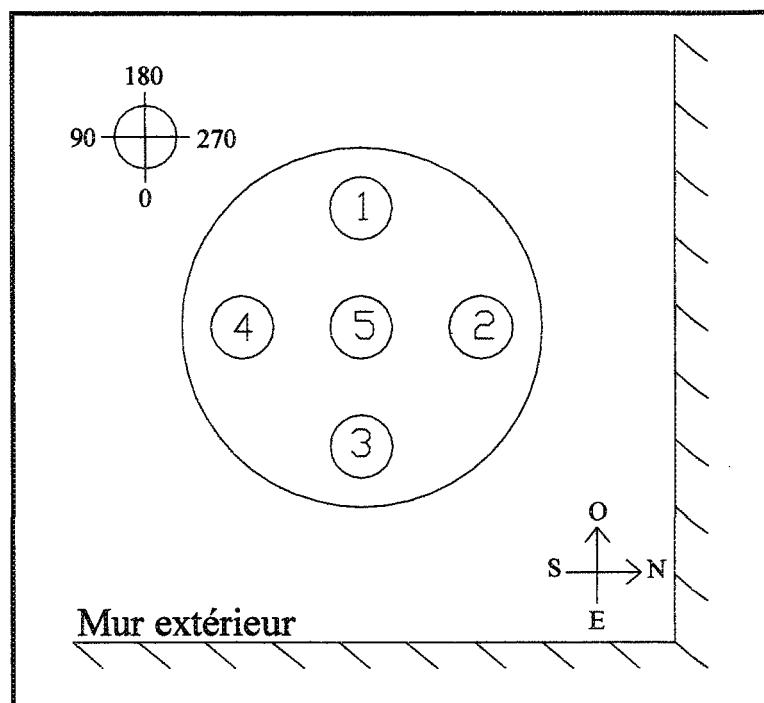


Figure 7.6 Puits d'alimentation vue de haut

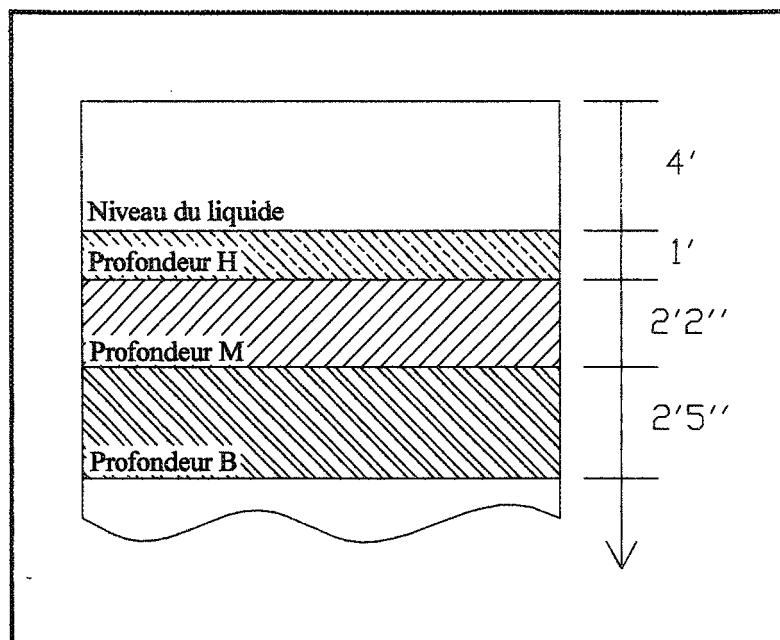


Figure 7.7 Puits d'alimentation vue de côté

7.2.3.1- Résultats

Le premier test s'est effectué à l'intérieur de l'ouverture numéro 3 à la profondeur « M ». La sonde permettant de calculer la grandeur de la vitesse de l'écoulement a d'abord été utilisée. Après avoir maximisé le courant mesuré en effectuant la rotation de la sonde, ce dernier a été mesuré à 74 mA. Le plan dans lequel le courant s'est avéré être maximum est l'axe 95-275 degrés. La température de l'électrolyte était de 70.0 °C. Par la suite, cette sonde a été débranchée et la tension a été appliquée à la sonde cylindrique avec restriction. Cette dernière a également été positionnée au trou numéro 3, profondeur « M » avec un angle vertical de 0 degrés c'est-à-dire le cylindre orienté avec le plan horizontal. La rotation à l'horizontal de la sonde cylindrique a permis de déterminer l'angle où le courant est maximal. Cet angle est approximativement de 300 degrés.

Optimiser le courant s'est avéré très difficile pour les deux cellules électrochimiques. En effet, une inspection visuelle à la surface du décanteur a permis de constater que l'écoulement était très turbulent et désorganisé ce qui peut expliquer pourquoi le courant fluctuait autant. L'optimisation du courant de la sonde cylindrique sur l'axe vertical a permis de constater que le courant semblait être maximal sur le plan horizontal (0 degrés). Toutefois, il est difficile de conclure avec certitude que le courant était maximal à cette position une fois de plus à cause de la très grande variabilité du courant lors de ce test.

Il a été impossible d'effectuer plus d'un test. En effet, une infiltration de liquide à l'intérieur de la sonde est survenue durant le second test. Suite à cette infiltration, le courant mesuré par les deux cellules électrochimiques est devenu constant et la tension de la source de tension diminuait lorsque les électrodes étaient immergées à l'intérieur du décanteur. L'analyse de la situation a permis de déterminer qu'il s'est créée une pile électrochimique lors de l'infiltration de l'électrolyte à l'intérieur de la sonde. La force contre-électromotrice ainsi créée agissait contre le potentiel de la source ce qui permet d'expliquer pourquoi la tension a diminué à ce moment. Une autre explication serait que cette chute de tension serait provoquée par la demande exigée à la source par les nouveaux courants de fuite causés par les infiltrations. Étant dans l'impossibilité de poursuivre les tests, la campagne de mesure a été interrompue.

7.2.4- Observations et conclusions sur le prototype

La tentative d'appliquer la méthode électrochimique utilisant un cylindre avec restriction sur un prototype en usine n'a pas eu tout le succès escompté. Bien que le cylindre avec restriction ait fait ses preuves sur le banc d'essai, plusieurs difficultés techniques ont nui à son utilisation en usine. Les observations présentées à l'intérieur de cette section devraient être considérées dans le but de concevoir un second prototype utilisable en milieu industriel n'ayant pas les faiblesses du premier prototype.

Premièrement, l'infiltration d'électrolyte à l'intérieur du prototype a possiblement été causée par une petite fissure qui s'est créée entre deux morceaux de plexiglas. Les contraintes thermiques qu'a subit cet appareil ont été très grandes. Lors de l'essai en usine, la sonde a été soumise à une grande variation thermique rapide, environ -10 °C à l'extérieur et environ 70 °C dans le décanteur. La boite contenant le moteur contrôlant la sonde est composée de 6 morceaux de plexiglas collés. La déformation des matériaux causée par la variation de la température a ainsi pu fissurer les joints, permettant l'infiltration du liquide à l'intérieur de la sonde. Afin de minimiser les risques de fissures, les matériaux employés devraient être testés afin de connaître leur comportement aux variations thermiques et au milieu dans lequel ils seront immersés. De plus, un montage fait d'une seule pièce serait souhaitable afin de minimiser les risques de décollement entre les morceaux. Deuxièmement, un problème de condensation est survenu lors du test en usine. Des gouttelettes d'eau sont apparues à l'intérieur de la boîte renfermant le servomoteur. Lorsque cette dernière a été scellée, aucune précaution particulière n'a été prise. Il aurait

cependant été nécessaire d'introduire un produit desséchant à l'intérieur afin d'éliminer l'humidité présente dans l'air enfermée. Il est à noter que l'utilisation de graisse résistant aux hautes températures s'est révélée être un moyen très efficace d'assurer l'étanchéité de l'axe de rotation raccordé au servomoteur et sortant de la boite de ce dernier. En effet, bien que du liquide ait pénétré à l'intérieur de cette boite, aucune infiltration n'a eu lieu à cet endroit.

Troisièmement, l'apparition d'un dépôt de boue a été constatée à l'intérieur du cylindre près de la restriction. Bien que ce dépôt ne fût pas suffisant pour boucher l'orifice de la restriction, il modifiait assurément l'écoulement. Dans le cadre de l'utilisation de la sonde dans un milieu comportant des suspensions solides, il serait pertinent d'étudier quel effet l'obstruction partielle du cylindre avec restriction a sur les mesures effectuées. Il est probable que l'accumulation de dépôts n'affecte pas la capacité directionnelle de la sonde tant que ces derniers n'obstruent pas significativement le cylindre. Dans le cas où l'accumulation de solide affecterait trop les mesures, il serait peut-être approprié d'envisager l'utilisation d'un cylindre d'un plus grand diamètre de façon à faciliter l'écoulement du fluide et ainsi éviter l'obstruction de la conduite.

Quatrièmement, l'utilisation d'une carte d'acquisition de données au lieu d'un multimètre faciliterait l'optimisation du courant car le multimètre a un temps de réponse plus lent à l'affichage. L'optimisation du courant avec le multimètre est ainsi plus difficile

puisque il n'est pas facile de reconnaître la forme de cloche caractéristique lorsque la sonde s'approche de l'axe du fluide.

Finalement, la configuration des deux types de sondes électrochimiques sur le prototype serait possiblement à revoir. En effet, avec le prototype actuel, la boite contenant le servomoteur obstrue l'écoulement autour de la sonde mesurant la grandeur de la vitesse lorsque le liquide provient du bas. Puisque la tige supportant les sondes obstrue déjà l'écoulement lorsqu'il est rapproché de l'axe vertical et en provenance du haut, il serait plus approprié de placer la sonde cylindrique avec restriction (et son servomoteur) au dessus de la sonde mesurant la grandeur de la vitesse. De cette manière, l'écoulement ne serait plus modifié lorsqu'il serait en provenance du bas.

En somme, les essais en usine ont permis de démontrer que la méthode de mesure fonctionne mais que des travaux étaient nécessaires afin d'assurer l'étanchéité du prototype et de modifier certain éléments de sa conception. En appliquant les recommandations énumérées précédemment, le second prototype serait certainement considérablement supérieur au prototype actuel.

CONCLUSION

L'objectif de ce projet de recherche est de développer une méthode de mesure des composantes de vitesse de la pulpe floculée dans les puits d'alimentation des décanteurs du procédé Bayer. Des températures approchant le point d'ébullition de l'eau, une concentration en caustique très élevée et un environnement industriel hostile et difficile d'accès décrivent le milieu où la méthode de mesure doit être employée.

Un banc d'essai a été conçu et assemblé afin de tester les prototypes de sonde. Ce dernier a été optimisé de façon à minimiser les vibrations et à assurer un déplacement constant de la sonde par rapport au fluide. L'électrolyte employé dans ce banc d'essai a été une solution aqueuse de NaOH à une concentration de 50 g/L.

Différentes configurations ont été expérimentées. Les électrodes libres avaient pour but de démontrer l'influence de la position des électrodes par rapport à l'écoulement. L'expérience a démontré que l'orientation des électrodes par rapport à la direction de l'écoulement avait influence légère mais significative sur le courant mesuré. Toutefois, ce

test n'a pas permis de déterminer si la cause de cet effet est géométrique ou hydrodynamique.

Deux paires d'électrodes ont été positionnées sur une sphère. Les expérimentations ont montré que chaque paire d'électrodes devait être employée séparément, car une interaction significative est présente lorsque les deux paires sont reliées au circuit électrique simultanément. Il a de plus été démontré que la position des électrodes par rapport à l'écoulement influence le courant mesuré, mais insuffisamment pour permettre de déterminer la direction de l'écoulement avec une précision acceptable.

L'utilisation d'un cylindre permet d'obtenir une mesure de courant variant en fonction de la position du cylindre par rapport à l'écoulement. Le courant est minimum lorsque le cylindre est perpendiculaire à l'écoulement et il est maximum lorsqu'il est colinéaire au fluide en mouvement. Il est toutefois impossible de déterminer le sens de l'écoulement de cette manière puisque les résultats sont symétriques entre 0 et 180 degrés.

Pour briser cette symétrie, une restriction est employée à l'une des extrémités du cylindre. Cette dernière diminue le diamètre du cylindre de 19 mm à 7.9 mm. Grâce à cette restriction, un courant maximum absolu est mesuré lorsque la restriction fait face à l'écoulement.

Le cylindre avec restriction permet de déterminer la direction de l'écoulement en maximisant le courant. Des tests sur banc d'essai ont en effet démontré qu'il était possible de localiser la provenance du fluide en effectuant la rotation de la sonde à l'intérieur de l'écoulement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Grjotheim,K., Kvande,H., « Introduction to aluminium electrolysis : understanding the Hall-Héroult process », Allemagne, Aluminium-Verlag, deuxième édition, 1993, 260 pages.
- [2] INGÉNIEURS DU GROUPE PECHINEY, « L'aluminium », Tome 1, Éditions Eyrolles, Paris, 1964, 939 pages.
- [3] Boivin, A., « Étude expérimentale sur le compactage de la boue rouge dans un décanteur semi-industriel », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Août 2004, 195 pages.
- [4] Perron, A., « Mesure de vitesse dans une solution électrolytique à force ionique élevée par une méthode electrochimique », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Septembre 2003, 152 pages.

- [5] Leclerc, A., Perron, A., Simard, G., Gagnon, M.J., and Peloquin, G., « Measurement of slurry velocity in the feed well of gravity settlers of the Bayer process by means of an electrochemical flowmeter », Light Metals, 2002, 57-68.
- [6] Leclerc, A., Perron, A., Simard, G., Gagnon, M.J., and Peloquin, G. « Influence of Bayer liquor composition on the measurement of slurry velocity using an electrochemical flowmeter », Light Metals, 2003, 99-103.
- [7] Signal Processing SA. « Ultrasonic Doppler velocity field and flow mapping », [http://www.signal-processing.com/tech/intro_udvf_frame.htm], (2004-01-17).
- [8] Morrison, G. L., Schobeiri M. T. et Pappu, K. R., « Five-hole pressure probe analysis technique », Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 9, No. 3, 1998, pp 153-158.
- [9] Nowack, C.F.R., « Improved calibration method for a five-hole spherical Pitot probe », Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 3, 1970, pp 21-26.
- [10] Paulsen, L., « Triple hot-wire technique for simultaneous measurements of instantaneous velocity components in turbulent flows », Journal of physics E : Scientific Instruments, Vol. 16, No.6, 1983, pp 554-562.

- [11] Wittmer, K. S., Devenport, W. J., Zsoldos, J. S., « A four-sensor hot-wire probe system for three-component velocity measurement », Experiments in fluids, Vol. 24, 1998, pp 416-423.
- [12] Berrand, P., Gadeau, R., « L'aluminium, Tome 1 / par les ingénieurs du Groupe Pechiney », Paris, Éditions Eyrolles, 1964, 935 pages.
- [13] Queensland Alumina, « A Flow Chart Process », Queensland Alumina Limited, Gladstone, Australia, 2002.
- [14] Caouette, Gaudreault., « Le procédé Bayer, partie 2 » Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, 1979, 87 pages.
- [15] Glover, S. M., Yan, Y. D., Jameson, G. J., Biggs, S., « Polymer Molecular Weight and Mixing Effects on Floc Compressibility and Filterability », 6^e World Congress of Chemical Engineering Melbourne, Centre for Multiphase Processes, University of New Castle, Callaghan, Australia, 2001.
- [16] Cousineau, P. G., « Physical properties of Bayer liquors and Slurries », Rapport no. KR-87/017, Alcan International Ltée, 1994.

- [17] MacInnes, D., « The principles of electrochemistry », New York, Dover publications, 1961, 478 pages.
- [18] Bard,A., Faulkner,L., « Électrochimie : Principes, méthodes et applications », Paris, Masson, 1983, 791 pages.
- [19] Oldham, H., Myland, J., « Fundamentals of electrochemical science », Toronto, Academic press, 1994, 474 pages.
- [20] Cussler, E., « Diffusion: Mass transfert in fluid systems », Seconde édition, Cambridge, University Press, 2001, 579 pages.
- [21] Levich, V., « Physiochemical Hydrodynamics », Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1962, 700 pages.
- [22] Munson, B., Young, D. et Okiishi, T., « Fundamentals of fluid mechanics », fifth edition, John Wiley & Sons, 2006, 769 pages.
- [23] White, f., « Fluid mechanics », fourth edition, McGraw-Hill, 1999, 826 pages.
- [24] Baillargeon, G., « Méthodes statistiques de l'ingénieur », 3^e édition, Les éditions SMG, Trois-Rivières, 1990, 686 pages.