



THÈSE

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN INGÉNIERIE

PAR

FATMA REBAÏNE

M.Sc. A

**ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE VIBRO-COMPACTION SUR
LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ANODES CRUES EN CARBONE**

DÉCEMBRE 2015

Je dédie cette thèse à mes chers parents et à mon mari qui tiennent une place immense dans mon cœur et qui sont la source de ma détermination.

RÉSUMÉ

La qualité des matières premières utilisées lors de la fabrication des anodes en carbone pour la production de l'aluminium primaire par le procédé Hall-Héroult se dégrade de jour en jour. Afin de pouvoir améliorer la qualité et du fait même la durée de vie ainsi que les coûts de production de ces anodes, dans le cadre de ce projet, l'intérêt est porté au procédé de vibro-compaction. Ce procédé fait partie des étapes importantes de la fabrication des anodes en carbone. Actuellement, dans la plupart des industries; ce sont les vibro-compacteurs qui sont utilisés pour la production des anodes. Les vibro-compacteurs sont plus performants en plus d'avoir un meilleur rendement. Cependant, ces machines nécessitent un contrôle de même qu'un suivi en continu afin d'éviter des bris majeurs vu leur fonction de base qui est la vibration. L'objectif de cette étude est de comprendre ce procédé et ainsi faire le lien entre les paramètres de vibro-compaction et les propriétés mécaniques des anodes crues.

La méthodologie élaborée pour répondre à la problématique et ainsi atteindre les objectifs de cette étude est basée simultanément sur des approches expérimentales et analytiques. L'approche expérimentale porte sur les caractérisations physiques et mécaniques des anodes industrielles et aussi sur les analyses des mesures vibratoires des vibro-compacteurs industriels et celui du laboratoire. Cette approche englobe également la fabrication des anodes en laboratoire avec des paramètres de vibro-compaction variables. Pour ce qui est de l'approche analytique, c'est le développement de modèles dynamiques du vibro-compacteur à un degré de liberté 1-DDL et à deux degrés de liberté 2-DDL qui ont été réalisés.

La première campagne de caractérisation porte sur la cartographie des propriétés physiques et mécaniques dans les trois directions de quatre anodes crues industrielles formées avec le même matériel et les mêmes conditions de malaxage et de vibro-compaction. Les résultats obtenus montrent que la qualité des anodes produites est largement affectée par les vibro-compacteurs qui sont utilisés lors de la formation de ces anodes. Par la suite, une autre campagne de caractérisation plus poussée a été réalisée sur huit anodes industrielles crues, mais cette fois-ci en prenant des mesures vibratoires afin de comprendre ce qui se passe réellement au niveau de la mécanique de fonctionnement des vibro-compacteurs. Les anodes testées ont été formées avec des matières premières et des conditions de vibro-compaction variables. Les résultats obtenus montrent que les propriétés des parties du bas de ces anodes sont relativement faibles comparées à celles du haut dans tous les cas étudiés. Ce résultat est relié aux accélérations générées entre les tables de vibration et les tiges-guides des vibro-compacteurs.

Une évaluation des principaux paramètres de vibro-compaction a été effectuée par l'équipe de vibro-compaction de la chaire UQAC-AAI sur le carbone. Les principaux paramètres ont été fournis à une entreprise externe pour la conception du vibro-compacteur

du laboratoire. Par la suite, une calibration de ce vibro-compacteur a été réalisée en effectuant des mesures vibratoires. Des procédures de suivi et de diagnostic de l'état du vibro-compacteur du laboratoire ont été établies dans ce projet. Actuellement, tous ceux qui utilisent cet équipement suivent ces procédures afin de mieux contrôler leur fabrication d'anodes. D'un autre côté, des anodes à l'échelle du laboratoire ayant la même recette de pâte que le partenaire industriel ont été fabriquées avec des paramètres de vibro-compaction variables. Les résultats obtenus montrent les relations existantes entre la variation des paramètres de vibro-compaction et la qualité des anodes formées. Cette campagne a permis aussi de calculer expérimentalement la rigidité de la pâte d'anode qui par la suite a été intégrée dans un modèle dynamique à deux degrés de liberté du vibro-compacteur développé dans ce projet de recherche. Ce modèle à 2-DDL développé est unique, car il permet de simuler les vibrations générées par les vibro-compacteurs en prenant en considération une rigidité de pâte actuelle mesurée expérimentalement. La validation de ce modèle est réalisée avec les données tirées de la revue de littérature de même qu'avec les données expérimentales obtenues durant la réalisation de cette thèse.

Au final, les travaux qui ont été réalisés durant ce projet ont permis d'avoir une meilleure compréhension du procédé de vibro-compaction de même qu'au niveau de la variation de la qualité des anodes crues. Cette étude a aidé à mieux diagnostiquer les problèmes mécaniques des vibro-compacteurs.

ABSTRACT

The quality of raw materials used for the fabrication of anodes utilized, in primary aluminum production, by the Hall-Héroult process is degrading with time. In order to improve the quality, the life, and the production cost of anodes, this project focuses on the vibro-compaction process. This process is one of the important steps of carbon anode production. Nowadays, most of the anode manufacturing plants use vibro-compactors for the fabrication of anodes. The vibro-compactors perform well and have high efficiency. However, these machines require continuous control as well as monitoring to avoid a major breakdown due to vibration which is their basic function. The objectives of this study are to understand the vibro-compaction process and to identify the relationship between the vibro-compaction parameters and the mechanical properties of the green anodes.

The methodology that has been developed to address the above issues and to achieve the objectives of this study is based on simultaneous experimental and analytical approaches. The experimental approach involves the physical and mechanical characterization of the industrial anodes as well as the analysis of the vibration measurements on the industrial and laboratory vibro-compactors. This approach also includes the fabrication of laboratory anodes using different parameters of vibro-compaction. The analytical approach covers the development of dynamic models of the vibro-compactor with one and two degrees of freedom (1-DDL and 2-DDL).

The first characterization study was on the 3D mapping of the physical and mechanical properties of four industrial green anodes produced using the same raw material as well as mixing and vibro-compaction conditions. The analysis of results showed that the quality of the anodes was significantly affected by the vibro-compactors used to fabricate the anodes. Subsequently, an industrial measurement and characterization campaign was carried out on eight industrial green anodes; but this time, vibration measurements were also conducted in order to understand the mechanical aspect of the operation of the vibro-compactors. The anodes tested were fabricated using different raw materials and under various vibro-compaction operating conditions. The results showed that the properties of the bottom part of these anodes were relatively inferior compared to those of the top part for all the cases studied. These results were related to the differences in acceleration generated between the vibration table and the guide rod of the top charge of the vibro-compactors.

The principal vibro-compaction parameters were evaluated by the vibro-compactor team of the Carbon Chair, and these were supplied to an external company for the design of the laboratory vibro-compactor. Then, the vibro-compactor was calibrated by carrying out vibration measurements. Procedures for the diagnosis and the monitoring of the state of the laboratory vibro-compactor were established in this project. All those who use this equipment follow these procedures now to better control the anode fabrication process. In

addition, different vibro-compaction parameters were used to produce laboratory scale anodes with the same paste recipe applied in industrial anode production. The results showed the relationships between the vibro-compaction parameters and the variation in the quality of the anodes formed. The analysis in the current project also helped determine experimentally the rigidity of the anode paste which was later used in the dynamic model of the vibro-compactor with two degrees of freedom. This 2-DDL model is unique because it can simulate the vibrations generated by the vibro-compactor taking into consideration the rigidity parameter of the paste as a function of vibro-compaction time. The validation of this model was carried out using published data from the literature and experimental data obtained during the realization of this thesis.

In conclusion, the work undertaken during this project led to a better understanding of the vibro-compaction process as well as its impact on the green anode quality depending on the conditions. In this study, diagnosis techniques have also been developed to determine the mechanical problems of vibro-compactors.

CONTRIBUTIONS ORIGINALES DE LA THÈSE

L'originalité de cette thèse porte sur l'influence des paramètres de vibro-compaction sur les propriétés mécaniques des anodes crues en carbone. Ces contributions peuvent être citées comme suit :

- Étude systématique des paramètres de vibro-compaction permettant d'établir les états stables possibles du système.
- Étude analytique et numérique en parallèle avec une étude expérimentale en laboratoire, et le tout est validé par des tests au niveau industriel.
- Fabrication d'anodes à l'échelle du laboratoire avec des paramètres de vibro-compaction variables.
- Développement d'une méthodologie permettant de tester les vibro-compacteurs durant la fabrication des anodes. Cette méthodologie d'essai est basée sur les mesures vibratoires des vibro-compacteurs industriels et du laboratoire.
- Réalisation de tests mécaniques et physiques selon les normes ASTM et ISO pour fin de validation de la qualité des anodes crues. Ces tests englobent les mesures des contraintes de flexion et de compression, du module de Young, de la densité apparente ainsi que de la résistivité électrique.
- Étude de l'influence de la variation des paramètres du procédé de vibro-compaction sur les propriétés mécaniques des anodes de carbone crues. Sachant la complexité du procédé de vibro-compaction, la variation d'un des paramètres de fonctionnement présente une influence significative sur la qualité et les propriétés des anodes produites ainsi que sur les coûts.
- Un modèle dynamique à 1-DDL simplifié du vibro-compacteur est développé en considérant tout le système comme étant une masse rigide suspendue sur des ressorts et sur des amortisseurs ; le tout est soumis à une excitation extérieure.
- Un deuxième modèle dynamique à 2-DDL est développé. Mais cette fois-ci, le comportement élastique de la pâte d'anode durant la vibro-compaction est représenté comme ayant une certaine rigidité variable et agissant comme un amortissement. Une validation expérimentale des modèles développés a été réalisée au niveau du laboratoire pour différents paramètres de vibration.

Parmi les résultats présentés dans cette thèse, certains ont été publiés dans des congrès et conférences internationales [1, 2, 3, 4, 5, 6].

AVANT-PROPOS

Contexte industriel

Ce projet de recherche intitulé « Influence des paramètres de vibro-compaction sur les propriétés mécaniques des anodes en carbone » a été réalisé dans le cadre du projet de la chaire de recherche industrielle de l'Université du Québec à Chicoutimi en collaboration avec l'Aluminerie Alouette. Cette chaire porte sur l'utilisation du carbone dans l'industrie de l'aluminium primaire. Plus spécifiquement, ce projet de recherche fait partie de la réalisation du deuxième volet de la chaire de recherche UQAC/AAI RDC-1 (le programme de recherche et développement collaboratif du CRSNG-première subvention) portant sur le développement d'une meilleure qualité d'anodes pour la production de l'aluminium primaire. Le premier volet de la chaire porte sur les effets des matières premières sur la qualité des anodes. Cette chaire est financée par l'aluminerie Alouette, le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG), le Développement économique Sept-Îles, l'Université du Québec à Chicoutimi et de la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi. En plus du support financier, l'Aluminerie Alouette a aussi apporté un important support technique.

Parmi les étapes de fabrication des anodes en carbone se trouve le procédé de vibro-compaction qui est un processus assez complexe créant d'énormes problèmes lors de la fabrication des anodes. Cette étape représente une force et un besoin au niveau de l'industrie. Ce projet de recherche a été réalisé en parallèle au niveau de l'UQAC et de l'industrie. Certains résultats de cette thèse ont été normalisés ou présentés de façon adimensionnelle à cause de la confidentialité, sans perdre le contexte scientifique et la valeur des résultats. D'autres projets portant sur les autres étapes de fabrication des anodes ont été réalisés dans le groupe de recherche sur le carbone. Il est utile de signaler que tous ces projets sont inter-reliés entre eux.

Remerciements

J'offre premièrement mes plus sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Mohamed Bouazara qui m'a supervisé tout au long de mes travaux. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie, car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de ce projet et a toujours veillé à ce que tout soit mis en œuvre pour que ma thèse se déroule dans des bonnes conditions. Merci infiniment pour vos multiples conseils.

Je tiens aussi à témoigner ma profonde reconnaissance envers mon codirecteur le professeur Daniel Marceau pour son support. J'adresse de même mes plus vifs remerciements au professeure Duygu Kocafe ma codirectrice et le professeur Yasar Kocafe membre de jury pour tous leurs conseils et pour m'avoir accueilli au sein du groupe de recherche sur le carbone. Ils m'ont toujours encouragé, leurs gentillesse me vont droit au cœur qu'ils en soient remerciés.

Ce travail de recherche réalisé chez le partenaire industriel aluminerie Alouette a été particulièrement facilité par madame Brigitte Morais à qui je tiens à exprimer tout particulièrement ma reconnaissance. Je tiens aussi à remercier tous les gens de l'usine avec lesquels j'ai travaillé et qui m'ont beaucoup aidé.

Je remercie de même tous les membres de mon jury qui, à chaque étape de mon cursus de formation, m'ont prodigué d'utiles conseils qui m'ont aidé à bien structurer mon étude. Mes vifs remerciements vont aussi au professeur-chercheur sous octroi Dipankar Bhattacharyay pour son support technique de même que pour tous les outils fournis durant la réalisation de ce projet. Mes remerciements vont également aux techniciens Dave Girard, Alexandre Morin et Jean Paquette pour toutes leurs aides ainsi que leurs disponibilités.

À titre plus personnel, je remercie mon cher époux pour son soutien quotidien indéfectible et son enthousiasme contagieux à l'égard de mes travaux comme dans la vie en général. Mes plus profonds remerciements vont à mes parents. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé. Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

Une reconnaissance particulière aux membres de ma famille, mon frère et ma sœur de même que leurs adorables enfants, qui en tout temps mon apporté soutien et

encouragement. Je te remercie infiniment, chère sœur, d'être ma confidente et d'avoir été toujours à mes côtés. Mes remerciements s'adressent particulièrement à ma grand-mère de même que ma belle-famille et sans oublier mon oncle Hakim. Je tiens aussi à remercier particulièrement mon cousin Djamel Rebaïne et sa famille qui m'ont toujours soutenue. Je remercie également toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études que ça soit dans le groupe de recherche ou en dehors, ce fut une très belle expérience.

Je voudrais également exprimer ma gratitude aux organismes ayant contribué à ce travail, soit : Le support technique et financier de l'Aluminerie Alouette Inc. ainsi que les supports financiers du Développement économique Sept-Îles, du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG), de l'Université du Québec à Chicoutimi, de la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi et du Regroupement aluminium REGAL.

Pour finir, je remercie toutes les personnes intéressées par mon travail, en espérant qu'elles puissent trouver dans cette thèse des explications utiles pour leurs propres travaux.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT.....	v
CONTRIBUTIONS ORIGINALES DE LA THÈSE	vii
AVANT-PROPOS	viii
TABLE DES MATIÈRES	xi
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES TABLEAUX	xix
CHAPITRE 1	21
INTRODUCTION GÉNÉRALE	21
1.1. Introduction.....	21
1.2. Problématique	24
1.3. Objectifs.....	28
1.4. Méthodologie	29
1.5. Contenu de la thèse	33
1.6. Conclusions.....	34
CHAPITRE 2	36
REVUE DE LITTÉRATURE.....	36
2.1. Introduction.....	36
2.2. Processus de fabrication des anodes	36
2.2.1. Matières premières.....	37
2.2.2. Malaxage.....	37
2.2.3. Pâte.....	38
2.3. Procédé de vibro-compaction	41
2.3.1. Vibro-compacteurs et mécanismes de fonctionnement	41
2.3.2. Effets des paramètres de vibro-compaction.....	46
2.3.3. Modèle dynamique du vibro-compacteur	53
2.4. Normes standard et caractérisations mécaniques.....	57
2.4.1. Tests mécaniques	57
2.4.2. Caractérisation mécanique des anodes et de la cathode	61
2.5. Conclusions.....	63
CHAPITRE 3	65

ÉTUDE VIBRATOIRE ET CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES : ANODES INDUSTRIELLES.....	65
3.1. Introduction.....	65
3.2. Méthodologie et procédure des essais	66
3.2.1. Campagne de 2011.....	66
3.2.2. Campagne de 2012.....	68
3.2.3. Test de flexion à trois points [ISO 12986-1 : 2000]	70
3.2.4. Test de compression uniaxiale [ASTM C695-91 : 2005 et ISO 18515:2007 (E)]	72
3.2.5. Mesure de la densité apparente [ASTM D5502-00].....	76
3.2.6. Mesure de la résistivité électrique [ASTM D6120-97]	78
3.2.7. Mesures vibratoires : Vibro-compacteurs industriels	79
3.3. Résultats et discussions.....	80
3.3.1. Variation des propriétés selon les trois axes-Campagne 2011	81
3.3.2. Comparaison selon les positions haut et bas de l'anode-Campagne 2012 ...	91
3.3.3. Comparaison selon les temps de vibration T1 et T2-Campagne 2012	98
3.3.4. Variation des accélérations-Campagne 2012.....	103
3.3.5. Comparaison des accélérations des quatre coins de la table-Campagne 2012	108
3.3.6. Corrélation entre les différentes propriétés-Campagne 2012	112
3.4. Conclusions.....	117
CHAPITRE 4.....	119
CONCEPTION ET CALIBRATION D'UN VIBRO-COMPACTEUR DE LABORATOIRE	119
4.1. Introduction.....	119
4.2. Comparaison entre vibro-compacteur industriel et celui du laboratoire.....	120
4.3. Calibration du vibro-compacteur	122
4.3.1. Calibration du système de charge	123
4.3.2. Calibration de la vitesse de vibration.....	125
4.3.3. Équipements et procédures de mesures vibratoires	126
4.4. Cartographie de la table de vibration	130
4.5. Variation des paramètres de vibro-compaction à vide.....	135
4.6. Comparaison entre les accélérations expérimentales et analytiques	140
4.7. Conclusions.....	144
CHAPITRE 5	146
ÉTUDE VIBRATOIRE ET CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES : ANODES UQAC.....	146

5.1.	Introduction.....	146
5.2.	Méthodologie et procédure des essais	146
5.2.1.	Calibration du vibro-compacteur avec anodes.....	147
5.2.2.	Procédures de fabrication des anodes en laboratoire	148
5.2.3.	Plan de fabrication des anodes en laboratoire.....	152
5.2.4.	Procédures de caractérisation des anodes du laboratoire.....	154
5.3.	Résultats et discussions.....	157
5.3.1.	Variation du déplacement-Excitation externe.....	157
5.3.2.	Variation de la vitesse de vibration.....	162
5.3.3.	Variation du temps de vibration.....	168
5.3.4.	Variation de la charge morte.....	173
5.3.5.	Variation de la pression de charge.....	177
5.4.	Comparaison des tendances (laboratoire-industrie).....	182
5.4.1.	Pression de charge	182
5.4.2.	Temps de vibration	183
5.4.3.	Résumé de l'impact des paramètres de vibro-compaction sur la qualité des anodes	185
5.5.	Application au niveau industriel	187
5.6.	Conclusions.....	190
CHAPITRE 6.....		193
DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES DYNAMIQUES POUR UN VIBRO-COMPACTEUR		193
6.1.	Introduction.....	193
6.2.	Modèle à 1-DDL.....	193
6.2.1.	Résolution mathématique du modèle à 1-DDL	194
6.2.2.	Modèle à 1-DDL analytique	196
6.2.3.	Modèle à 1-DDL sous Simulink	198
6.3.	Modèle à 2-DDL.....	202
6.3.1.	Résolution mathématique du modèle à 2-DDL	203
6.3.2.	Modèle à 2-DDL sous Simulink	204
6.3.3.	Validation du modèle à 2-DDL	207
6.3.4.	Rigidité de la pâte en échelon	210
6.3.5.	Modèle à 2-DDL-Vibro-compacteur industriel	214
6.4.	Modèle à 2-DDL optimisé	217
6.5.	Conclusions.....	221
CHAPITRE 7.....		223
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		223

7.1. Conclusions.....	223
7.2. Recommandations.....	229
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	231

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Blocs d’anodes de carbone [9].	22
Figure 1.2 : Presse hydraulique LAEIS 2500 [11].	22
Figure 1.3 : Vibro-compacteurs Xelios [12].	22
Figure 1.4 : Fissurations sur les côtés [18].	23
Figure 1.5 : Fissurations verticales [18].	23
Figure 1.6 : Fissurations horizontales [18].	23
Figure 1.7 : Processus de fabrication des anodes [25].	25
Figure 1.8 : Schéma représentatif des principaux éléments d’un vibro-compacteur.	26
Figure 1.9 : Organigramme de la méthodologie	32
Figure 2.1 : Montage de l’essai de caractérisation de la pâte à chaud [61].	39
Figure 2.2 : Effet du taux de chargement sur la densité apparente d’anode crue [65].	40
Figure 2.3 : Vibro-compacteurs à unité simple et à système tournant [70].	42
Figure 2.4 : Différentes dispositions du balourd des vibro-compacteurs [10].	43
Figure 2.5 : Évolution des isolateurs vibratoires au fil du temps.	44
Figure 2.6 : Schéma représentatif des contrepoids excentriques.	44
Figure 2.7 : Influence du temps de vibration sur la densité des anodes crues [70].	49
Figure 2.8 : Influence du temps de vibration sur la résistance à la compression [73].	50
Figure 2.9 : Influence du temps de vibration sur le module de Young [73].	50
Figure 2.10 : Influence du temps de vibration sur la résistivité électrique [73].	50
Figure 2.11 : Influence du temps de vibration sur la densité apparente [73].	50
Figure 2.12: Résistance à la compression en fonction de la fréquence de vibration [70]. ...	51
Figure 2.13 : Densité apparente en fonction de la fréquence de vibration [70].	51
Figure 2.14 : Variation de la densité apparente en fonction de la vitesse de vibration [75].	51
Figure 2.15 : La force en fonction de l’angle et de la vitesse de vibration [70].	52
Figure 2.16 : Distribution des contrepoids sur le vibro-compacteur [70].	52
Figure 2.17 : Variation de la densité apparente en fonction de l’angle des contrepoids excentriques [70].	53
Figure 2.18 : Variation de la densité apparente en fonction de la force de vibration [75]. ..	53
Figure 2.19 : Modèle numérique 1-D du vibro-compacteur [76].	55
Figure 2.20 : Représentation du modèle mathématique [77].	57
Figure 2.21 : Balle bondissante [78].	57
Figure 2.22 : Test de flexion à trois points (ISO 12986-1 : 2000) [26].	59
Figure 2.23 : Test de flexion à quatre points (ASTM C651-91 : 2005) [79].	59
Figure 2.24 : Appareillage de l’essai de traction (ASTM C 749-08) [88].	60
Figure 2.25 : Test de compression (ASTM C695-91 : 2005) [27]	60
Figure 2.26 : Différents modèles des échantillons d’essais [92].	61
Figure 3.1 : Plan de carottage des quatre anodes crues-Campagne 2011.	67
Figure 3.2 : Plan de carottage des huit anodes crues-Campagne 2012.	69
Figure 3.3 : Schéma représentatif du test de flexion à trois points [18].	71

Figure 3.4 : Équipement du test de flexion à trois points.	72
Figure 3.5 : Test de compression uniaxiale.	74
Figure 3.6 : Équipement du test de compression uniaxiale.	74
Figure 3.7 : Variation de la résistance en compression en fonction de la déformation.	75
Figure 3.8 : Calcul du module de Young en compression.	76
Figure 3.9 : Mesure de la densité apparente [29].	77
Figure 3.10 : Montage de mesure de la résistivité électrique.	79
Figure 3.11 : Position des accéléromètres des mesures vibratoires industrielles.	80
Figure 3.12 : Variation du module de Young en fonction de la résistance en compression.	86
Figure 3.13 : Distribution normale des données de la résistance en flexion.	92
Figure 3.14 : Variation de la résistance à la flexion selon les positions-Anodes 2012.	94
Figure 3.15 : Variation de la résistance en compression selon les positions-Anodes 2012.	94
Figure 3.16 : Variation du module de Young selon les positions-Anodes 2012.	95
Figure 3.17 : Variation de la densité apparente selon les positions-Anodes 2012.	95
Figure 3.18 : Variation de résistivité électrique selon les positions-Anodes 2012.	96
Figure 3.19 : Variation de la résistance en flexion selon le temps de vibration-Anodes 2012.	100
Figure 3.20 : Variation de la résistance en compression selon le temps de vibration-Anodes 2012.	100
Figure 3.21 : Variation du module de Young selon le temps de vibration-Anodes 2012.	101
Figure 3.22 : Variation de la densité apparente selon le temps de vibration-Anodes 2012.	101
Figure 3.23 : Variation de la résistivité électrique selon le temps de vibration-Anodes 2012.	102
Figure 3.24 : Variation de l'accélération de la tige-Anodes 2012.	105
Figure 3.25 : Variation de l'accélération de la table-Anodes 2012.	106
Figure 3.26 : Variation de la différence d'accélération entre table et tige-Anodes 2012.	106
Figure 3.27 : Accélération de la table du vibro-compacteur A-Campagne 2012.	109
Figure 3.28 : Accélération de la table du vibro-compacteur B-Campagne 2012.	110
Figure 3.29 : Accélération de la table du vibro-compacteur C-Campagne 2012.	110
Figure 3.30 : Accélération de la table du vibro-compacteur D-Campagne 2012.	111
Figure 3.31 : Position de la fissure pour la table du vibro-compacteur B.	111
Figure 4.1 : Vibro-compacteur du laboratoire [UQAC].	122
Figure 4.2 : Système de charge du vibro-compacteur du laboratoire.	123
Figure 4.3: Charte de la variation de la pression du ballon de charge.	124
Figure 4.4 : Position de mesure de la vitesse de vibration avec le tachéomètre.	125
Figure 4.5 : Modélisation d'un accéléromètre.	129
Figure 4.6 : Cartographie de la table de vibration.	131
Figure 4.7 : Montage de mesure vibratoire à vide.	132
Figure 4.8 : Exemple de calcul du RMS.	132
Figure 4.9 : Cartographie 3-D de la table de vibration avec les anciens guides linéaire.	133

Figure 4.10 : Cartographie 3-D de la table de vibration avec les nouveaux guides linéaire.	134
Figure 4.11 : Variation de l'accélération en fonction de la vitesse et du déplacement.	136
Figure 4.12: Distribution de la population des mesures d'accélération.....	137
Figure 4.13 : Variation de l'accélération en fonction du déplacement et de la vitesse.	138
Figure 4.14 : Histogramme de l'importance du déplacement et de la vitesse par rapport à l'accélération.....	139
Figure 4.15 : Variation de l'accélération analytiquement.....	143
Figure 4.16 : Variation de l'accélération expérimentalement.....	144
Figure 5.1 : Amélioration de la fabrication des anodes en laboratoire.	147
Figure 5.2 : Variation de l'accélération de la pâte en fonction de la vitesse.	148
Figure 5.3 : Équipement pour le tamisage.	149
Figure 5.4 : Malaxeur du laboratoire.	150
Figure 5.5 : Accélérations superposées de la table et de la tige.....	151
Figure 5.6 : Série d'anodes du laboratoire.	155
Figure 5.7 : Plan de carottage des anodes en laboratoire.....	155
Figure 5.8 : Exemple d'une anode carottée et série d'échantillons.	156
Figure 5.9 : Variation de la résistance en flexion en fonction du déplacement.	159
Figure 5.10 : Variation de la résistance en compression en fonction du déplacement.	159
Figure 5.11 : Variation du module de Young en fonction du déplacement.	160
Figure 5.12 : Variation de la densité apparente en fonction du déplacement.	160
Figure 5.13 : Variation de la résistivité électrique en fonction du déplacement.	161
Figure 5.14 : Variation de la résistance en flexion en fonction de la vitesse de vibration.	164
Figure 5.15 : Variation de la résistance en compression en fonction de la vitesse de vibration.	164
Figure 5.16 : Variation du module de Young en fonction de la vitesse de vibration.	165
Figure 5.17 : Variation de la densité apparente en fonction de la vitesse de vibration.	165
Figure 5.18 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la vitesse de vibration.	166
Figure 5.19 : Variation de la résistance en flexion en fonction du temps de vibration.	169
Figure 5.20 : Variation de la résistance en compression en fonction du temps de vibration.	170
Figure 5.21 : Variation du module de Young en fonction du temps de vibration.	170
Figure 5.22 : Variation de la densité apparente en fonction du temps de vibration.	171
Figure 5.23 : Variation de la résistivité électrique en fonction du temps de vibration.	171
Figure 5.24 : Variation de la résistance en flexion en fonction de la charge.....	174
Figure 5.25 : Variation de la résistance en compression en fonction de la charge.	175
Figure 5.26 : Variation du module de Young en fonction de la charge.....	175
Figure 5.27 : Variation de la densité apparente en fonction de la charge.....	176
Figure 5.28 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la charge.	176
Figure 5.29 : Variation de la résistance en flexion en fonction de la pression.	179
Figure 5.30 : Variation de la résistance en compression en fonction de la pression.	179
Figure 5.31 : Variation du module de Young en fonction de la pression.	180

Figure 5.32 : Variation de la densité apparente en fonction de la pression.	180
Figure 5.33 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la pression.....	181
Figure 5.34 : Variation de la densité des anodes crues en fonction des pressions des ballons du haut et du bas ($P_3 > P_2 > P_1$).	189
Figure 6.1 : Modèle dynamique à 1-DDL du vibro-compacteur.	194
Figure 6.2 : Réponse temporelle libre et en régime permanent du vibro-compacteur- Matlab®.	197
Figure 6.3 : Solution générale du déplacement du vibro-compacteur-Matlab®.	198
Figure 6.4 : Modèle Simulink à 1-DDL du vibro-compacteur.	199
Figure 6.5 : Déplacement vertical du vibro-compacteur-Simulink.	199
Figure 6.6 : Accélération du vibro-compacteur-Simulink.	200
Figure 6.7 : Résonance du système.....	201
Figure 6.8 : Modèle à 2-DDL du vibro-compacteur.....	202
Figure 6.9 : Représentation simplifiée du modèle à 2-DDL.....	203
Figure 6.10 : Diagramme des corps libres du modèle à 2-DDL.....	204
Figure 6.11: Modèle à 2-DDL sous Simulink.....	206
Figure 6.12 : Déplacement de la table (modèle littérature) [108].....	208
Figure 6.13 : Déplacement de la tige (modèle littérature) [108].	208
Figure 6.14 : Déplacement de la table (modèle Simulink).	209
Figure 6.15 : Déplacement de la tige (modèle Simulink).	209
Figure 6.16 : Variation du déplacement de la tige durant la vibro-compactation de la pâte en fonction du temps.....	211
Figure 6.17 : Position de la référence du déplacement de la charge.....	212
Figure 6.18 : Position des paliers de déplacement de la pâte.	213
Figure 6.19 : Modèle à 2-DDL optimisé.....	217
Figure 6.20 : Représentation simplifiée du modèle à 2-DDL optimisé.....	218
Figure 6.21 : Diagramme des corps libres du modèle à 2-DDL.....	218
Figure 6.22: Modèle à 2-DDL optimisé sous Simulink.....	220

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Comparaison entre les propriétés des anodes pressées et vibrées [70].	46
Tableau 2.2 : Paramètres de vibro-compaction utilisés dans le monde entier [70].	47
Tableau 2.3 : Influence du temps de vibration sur la qualité des anodes (15 et 16 % de brai) [70].	47
Tableau 2.4 : Influence du temps de vibration sur la qualité des anodes (17 et 18 % de brai) [70].	48
Tableau 2.5 : Caractéristiques des anodes précuites dans le monde entier [93].	62
Tableau 3.1 : Distribution des échantillons-Campagne 2011.	67
Tableau 3.2 : Propriétés des huit anodes pour chacun des vibro-compacteurs.	68
Tableau 3.3 : Correspondance des différents paramètres du tableau 3. 2.	69
Tableau 3.4 : Différents tests des échantillons de la campagne 2012.	70
Tableau 3.5 : Variation de la résistance à la flexion selon les trois axes.	82
Tableau 3.6 : Variation de la résistance à la compression selon les trois axes.	84
Tableau 3.7 : Rapport entre les résistances de compression et de flexion.	84
Tableau 3.8 : Variation du module de Young selon les trois axes.	85
Tableau 3.9 : Variation de la densité apparente selon les trois axes.	87
Tableau 3.10 : Variation de la résistivité électrique selon les trois axes.	88
Tableau 3.11 : Valeurs de p-Campagne 2011.	90
Tableau 3.12 : Classement des paramètres ayant une forte dépendance-Campagne 2011.	90
Tableau 3.13 : Valeurs de p pour les propriétés des échantillons hauts et bas-Anodes 2012.	93
Tableau 3.14 : Variation des propriétés selon les positions du haut et du bas.	96
Tableau 3.15 : Valeurs de p pour la variation du temps de vibration.	99
Tableau 3.16 : Variation des propriétés selon les temps de vibration T1 et T2.	102
Tableau 3.17 : Valeurs de p pour les mesures d'accélération-Anodes-2012.	104
Tableau 3.18 : Variation des accélérations des quatre vibro-compacteurs.	107
Tableau 3.19 : Valeurs de p des mesures d'accélération-Campagne 2012.	112
Tableau 3.20 : Liste de paramètres à forte dépendance : Mesures d'accélération.	114
Tableau 3.21 : Valeurs de p des caractérisations physiques et mécaniques-Campagne 2012.	115
Tableau 3.22 : Liste de paramètres à forte dépendance: Propriétés physiques et mécaniques.	116
Tableau 4.1 : Paramètres de conception du vibro-compacteur du laboratoire.	120
Tableau 4.2 : Variation de la charge (%) en fonction de la pression et de la hauteur.	124
Tableau 4.3 : Comparaison des chartes de vitesses réelles/nominales	126
Tableau 4.4 : Équipements de mesure vibratoire.	127
Tableau 4.5 : Différentes vitesses testées pour les mesures vibratoires à vide.	135

Tableau 4.6 : Vitesses de vibration.....	141
Tableau 4.7 : Résultats des accélérations en % analytiques et expérimentales.	142
Tableau 5.1: Plan préliminaire de fabrication des anodes en laboratoire.	153
Tableau 5.2 : Plan de fabrication des anodes en laboratoire.....	154
Tableau 5.3 : Pourcentage des variations des paramètres de vibro-compaction.	154
Tableau 5.4 : Plan des tests physiques et mécaniques d'une anode du laboratoire.	156
Tableau 5.5 : Anodes du laboratoire avec différents déplacements des excentriques.	158
Tableau 5.6 : Différents échantillons testés – Déplacement variable.	158
Tableau 5.7 : Propriétés physiques et mécaniques – Déplacement variable.	158
Tableau 5.8 : Anodes du laboratoire fabriquées avec des vitesses variables.....	162
Tableau 5.9 : Différents échantillons testés – Vitesse variable.	163
Tableau 5.10 : Propriétés physiques et mécaniques –Vitesse variable.....	163
Tableau 5.11 : Anodes du laboratoire fabriquées avec des temps de vibration variables. .	168
Tableau 5.12 : Différents échantillons testés – Temps de vibration variable.	168
Tableau 5.13 : Propriétés physiques et mécaniques – Temps variable.....	169
Tableau 5.14 : Anodes du laboratoire fabriquées avec des charges mortes variables.	173
Tableau 5.15 : Différents échantillons testés – Charge morte variable.	173
Tableau 5.16 : Propriétés physiques et mécaniques – Charge variable.	174
Tableau 5.17 : Anodes du laboratoire fabriquées avec des pressions de charge variables.	178
Tableau 5.18 : Différents échantillons testés – Pression de charge variable.	178
Tableau 5.19 : Propriétés physiques et mécaniques – Pression variable.	178
Tableau 6.1: Paramètres du vibro-compacteur-Modèle à 1-DDL [108].....	196
Tableau 6. 2: Paramètres du vibro-compacteur-Modèle à 2-DDL [108].....	207
Tableau 6.3 : Valeurs expérimentales de la rigidité de la pâte d'anode en laboratoire.	214
Tableau 6.4 : Variation de l'accélération-Rigidité de pâte k_{21}	215
Tableau 6.5 : Variation de l'accélération-Rigidité moyenne des trois paliers.	215
Tableau 6.6 : Variation de l'accélération-Rigidité de pâte du palier 3.	216
Tableau 6.7 : Comparaison des accélérations RMS (Modèles à 2-DDL-Expérimentale) ..	216
Tableau 6.8 : Comparaison des accélérations RMS (Modèles à 2-DDL optimisé- Expérimentale).....	221

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1. Introduction

L'industrie d'aluminium au Québec consomme à elle seule près de 1,27 million de tonnes par an de carbone pour la production des anodes. Ces dernières représentent 17 % des coûts de production de l'aluminium et leurs matières premières représentent 50 % des coûts de production [7, 8]. La qualité de ces anodes a un très grand impact sur la production de l'aluminium primaire. Leurs performances peuvent être évaluées par leurs diverses propriétés mécaniques, électriques, physiques et chimiques, telles que la densité, la résistivité électrique, les résistances en flexion et en compression, les réactivités à l'air et au CO₂ et autres. Lors de la fabrication de l'aluminium primaire dans les cuves d'électrolyse par le procédé Hall Héroult, l'aluminium tend à se déposer au fond de la cuve tandis que l'oxygène réagit avec le carbone des anodes pour se dégager essentiellement sous forme de CO₂. Cette réaction chimique du carbone force le remplacement régulier des anodes à un intervalle d'environ 30 jours. La figure 1.1 [9] présente une série de blocs d'anodes telles que celle utilisée pour la production de l'aluminium primaire.



Figure 1.1 : Blocs d'anodes de carbone [9].

Auparavant, les presses hydrauliques étaient utilisées pour la formation des anodes. À partir des années soixante-dix; beaucoup de ces presses sont remplacées avec l'arrivée des vibro-compacteurs qui non seulement ont un meilleur rendement et plus de performances, mais aussi ils peuvent former de plus grandes anodes à des températures plus élevées [10]. Cependant, les vibro-compacteurs requièrent beaucoup plus de suivi et de maintenance. Un modèle de presse hydraulique [11] ainsi qu'un modèle de vibro-compacteur [12] utilisés pour la production des anodes sont respectivement présentés à la figure 1.2 et à la figure 1.3.



Figure 1.2 : Presse hydraulique LAEIS 2500 [11].



Figure 1.3 : Vibro-compacteurs Xelios [12].

La qualité des anodes est largement influencée par la qualité des matières premières ainsi que par le processus de fabrication représentant le malaxage et le vibro-compactage [13, 14, 15, 16, 17]. Les figures suivantes : figure 1.4, figure 1.5 et figure 1.6 présentent trois types de fissurations observées sur les anodes [18]. Chacune de ces catégories de fissures sont provoquées par des conditions spécifiques associées au processus de fabrication des anodes ou par les conditions d'exploitations dans les cuves d'électrolyse [19, 20, 21, 22]. C'est le cas de la figure 1.6 qui est le plus souvent rencontré sur les anodes crues au processus de vibro-compactation.



Figure 1.4 : Fissurations sur les côtés [18].

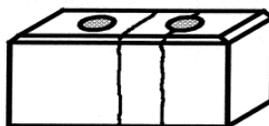


Figure 1.5 : Fissurations verticales [18].



Figure 1.6 : Fissurations horizontales [18].

Dans ce projet, une attention particulière est consacrée à l'étude des différents paramètres de vibro-compactation, étape cruciale dans le procédé de fabrication des anodes. Des mesures vibratoires ont été réalisées au niveau des vibro-compacteurs industriels ainsi que sur celui du laboratoire. En utilisant la même recette de pâte avec des paramètres de vibro-compactation variables, des anodes à l'échelle du laboratoire ont été fabriquées. Une étude vibratoire du vibro-compacteur du laboratoire est aussi réalisée.

Afin de faire une liaison entre la caractérisation mécanique des anodes à l'étude dynamique et vibratoire du vibro-compacteur, différents tests mécaniques ont été réalisés sur des anodes crues provenant du partenaire industriel ainsi que du laboratoire UQAC. En

effet, les propriétés mécaniques des anodes sont largement influencées par le processus de vibro-compactation et par bien d'autres paramètres tels que la qualité des matières premières ainsi que les processus de cuisson et de refroidissement [23]. En somme, ce projet de recherche représente la deuxième partie de la réalisation du projet de la chaire de recherche industrielle UQAC/AAI sur l'utilisation du carbone dans l'industrie d'aluminium primaire.

1.2. Problématique

Les matières premières ainsi que le procédé de fabrication [24] affectent beaucoup la qualité et les propriétés mécaniques des anodes. Lors du processus de fabrication, les matières premières constituées de coke, de rejet cru ou cuit et de mégot qui représente la quantité restante de l'anode après le passage au procédé de l'électrolyse sont broyées, mélangées avec le brai pour former une pâte. Par la suite, la pâte est prête et est placée dans un vibro-compacteur pour une mise en forme avant de subir un processus de cuisson et de refroidissement. Le bon déroulement de ces différentes étapes améliore la qualité et les propriétés mécaniques des anodes. Les différentes étapes de fabrication des anodes sont présentées à la figure 1.7 [25].

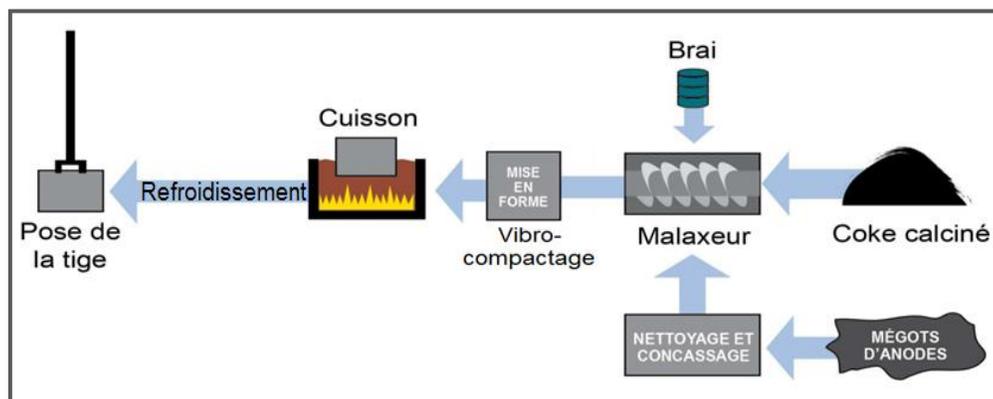


Figure 1.7 : Processus de fabrication des anodes [25].

Dans le cas de cette étude, l'intérêt est porté sur le processus de vibro-compaction, qui est un procédé assez complexe. En général, les vibro-compacteurs sont constitués principalement d'une table vibrante montée sur des isolations vibratoires, d'un moule où la pâte d'anode est versée ainsi que d'un couvercle qui aide à la compaction de la pâte. Les poids excentriques situés au-dessous de la table sont entraînés en rotation par un moteur. Ces derniers qui sont aussi appelés « balourds » génèrent des forces de vibration en tournant. La figure 1.8 montre ces principaux éléments constituant le vibro-compacteur.

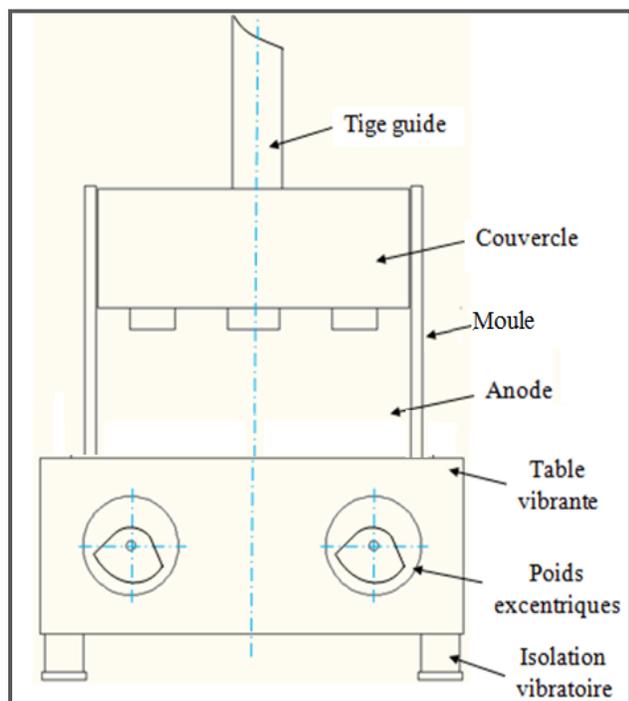


Figure 1.8 : Schéma représentatif des principaux éléments d'un vibro-compacteur.

Une meilleure compréhension du fonctionnement des vibro-compacteurs permet de diminuer la variation des propriétés entre les anodes formées. Par le fait même, elle optimise la performance en production d'aluminium. Les paramètres critiques du procédé de vibro-compaction sont entre autres; le temps de vibration, l'amplitude de vibration, la vitesse de vibration ainsi que la charge et la pression appliquée. Si les anodes ne sont pas bien vibro-compactées, leur résistance mécanique s'affaiblit et cela cause la formation prématurée de fissures.

Au fil des années, la qualité des matières premières se dégrade, ce qui conduit les industries à faire des changements de recettes pour compenser les caractéristiques des matières premières. De ce fait, une problématique survient au niveau de l'optimisation de

la meilleure vibration pour les différents types de coke et de brai. Les essais des différents paramètres d'opération des vibro-compacteurs industriels peuvent entraîner des bris majeurs. C'est pourquoi, cette étude permet d'établir l'intervalle des essais possibles pour l'industrie. Cette étape est une force et un besoin pour l'industrie, elle permet de travailler dans un régime efficace et sécuritaire. Par conséquent, une étude de calibration des différents paramètres de vibro-compaction est nécessaire afin d'obtenir des anodes de qualité avec un minimum coût possible et un meilleur rendement au niveau des vibro-compacteurs. Une meilleure qualité d'anode, donc de plus faible réactivité permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

De ce fait, une étude dynamique et vibratoire du vibro-compacteur ainsi qu'une caractérisation des propriétés mécaniques des anodes sont les outils adéquats qui permettent d'avoir une meilleure compréhension des différents phénomènes en présence lors de l'élaboration de l'anode. Au niveau des essais mécaniques, une problématique survient en termes de préparation et de normalisation des échantillons ainsi que pour l'équipement nécessaire à la réalisation de ces tests. À ce jour, les travaux réalisés ne permettent pas d'évaluer clairement la relation existante entre les paramètres du procédé de vibro-compaction avec les propriétés mécaniques ainsi que la qualité des anodes formées.

1.3. Objectifs

Le but principal de ce travail de recherche est d'étudier l'influence des paramètres de vibro-compaction sur les propriétés mécaniques des anodes de carbone. Pour pouvoir réaliser ce projet, les objectifs suivants sont fixés:

- Identifier les paramètres essentiels du procédé de vibro-compaction.
- Varier les paramètres de vibro-compaction.
- Tester la qualité des anodes crues.
- Suivre l'état des équipements par les mesures vibratoires.
- Optimiser la performance des vibro-compacteurs.
- Améliorer la qualité des anodes industrielles.
- Établir une procédure pour optimiser les paramètres d'opération (industrie et laboratoire).
- Développer un modèle dynamique du vibro-compacteur.

Plus spécifiquement, cette étude vise à améliorer les paramètres de vibro-compaction qui influent beaucoup sur la qualité des anodes. À plus long terme, les fruits de ce travail permettront de faire un gain économique considérable à l'entreprise. Ce gain peut être au niveau de la qualité et du temps de compaction, sur les performances des équipements, ainsi qu'au niveau environnemental. Au final, le tout permet de contribuer au développement de la recherche.

1.4. Méthodologie

Afin de pouvoir répondre à la problématique et ainsi atteindre les objectifs de ce travail, la méthodologie suivie passe par une approche en quatre volets :

- **Volet 1** : Recherche bibliographique

En premier lieu, pour la revue de littérature, les recherches se sont basées sur les points suivants :

- Processus de fabrication des anodes.
- Procédé de vibro-compaction.
- Normes standard et caractérisation des propriétés mécaniques.

- **Volet 2** : Anodes industrielles

Ce volet présente les résultats de l'étude vibratoire et de la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des anodes crues industrielles. Pour ce faire, deux campagnes de mesures et de caractérisation ont été établies en 2011 et 2012 chez le partenaire industriel. La campagne de 2011 a porté sur la caractérisation physique et mécanique de quatre anodes crues industrielles. Une comparaison des propriétés selon les trois axes a été réalisée. Par la suite, pour ce qui est de la campagne de 2012 ce sont huit anodes crues qui ont été caractérisées et une étude vibratoire du comportement des vibro-compacteurs industriels durant la formation de ces anodes a été établie. Des comparaisons des résultats selon le temps de vibration, la position des échantillons et les accélérations ont été faites pour ces anodes de la campagne de 2012. Les différentes caractérisations

physiques et mécaniques sont réalisées selon les normes ASTM et ISO. Des tests de flexion à trois points (ISO 12986-1 : 2000 [26]), de compression uniaxiale (ASTM C695-91 : 2005 [27] et ISO 18515: 2007 (E) [28]), des mesures de la densité apparente [29] ainsi que de la résistivité électrique [30] ont été établis. Ces tests sont effectués sur des échantillons d'anodes crues industriels en se basant sur la norme ASTM D6353-06 [31] d'échantillonnage. Par ailleurs, les propriétés mécaniques obtenues lors de cette étude ont été utiles pour alimenter la partie modélisation qui est développée dans un autre projet portant sur un modèle thermomécanique des anodes au four à cuisson.

- **Volet 3 : Vibro-compacteur du laboratoire**

Afin de pouvoir varier les différents paramètres de vibro-compaction et de pouvoir étudier leurs effets sur la qualité des anodes crues produites, un banc d'essai du vibro-compacteur de laboratoire est installé et calibré. Par la suite, des séries de mesures vibratoires à vide et avec anodes du vibro-compacteur de laboratoire ont été réalisées. Ces mesures permettent de savoir le degré de vibro-compaction des anodes, les vitesses de vibration, l'accélération et l'amplitude de vibration. Elles permettent aussi de diagnostiquer l'état du fonctionnement des vibro-compacteurs.

- **Volet 4 : Anodes UQAC**

Une fois que la calibration du vibro-compacteur du laboratoire a été faite, un plan de fabrication des anodes de laboratoire a été établi afin de pouvoir optimiser les paramètres de vibro-compaction. Les paramètres de vibro-compaction qui ont été variés sont : le

temps, le déplacement, la vitesse, la charge et la pression de charge. La recette de pâte de même que les conditions de malaxage ont été maintenues les mêmes. Des caractérisations physiques et mécaniques ont été faites sur les anodes crues formées au laboratoire. Cette étape permet à son tour d'obtenir l'effet de la variation des différents paramètres sur la qualité et les propriétés mécaniques des anodes crues produites et aider à l'identification des conditions optimales du procédé de vibro-compaction.

- **Volet 5 : Modèles dynamiques du vibro-compacteur**

Ce volet est consacré au développement de modèles dynamiques du vibro-compacteur permettant de simuler le comportement dynamique et les accélérations de ces machines. Pour ce faire, au départ un modèle dynamique à un degré de liberté du vibro-compacteur a été développé. Ce modèle a permis de valider l'approche à utiliser dans des cas plus complexes comme dans le cas du modèle à deux degrés de liberté développé. Dans le cas du modèle à 2-DDL, la rigidité de la pâte d'anode a été établie expérimentalement en laboratoire de même que chez le partenaire industriel. Par la suite, un troisième modèle à deux degrés de liberté optimisé du vibro-compacteur a été développé incluant la rigidité générée par les ballons de charge. Les résultats obtenus par ce modèle permettent de simuler au mieux les accélérations générées par la table de vibration de même que la tige guide. Un résumé des différents volets de cette méthodologie est présenté à la figure 1.9.

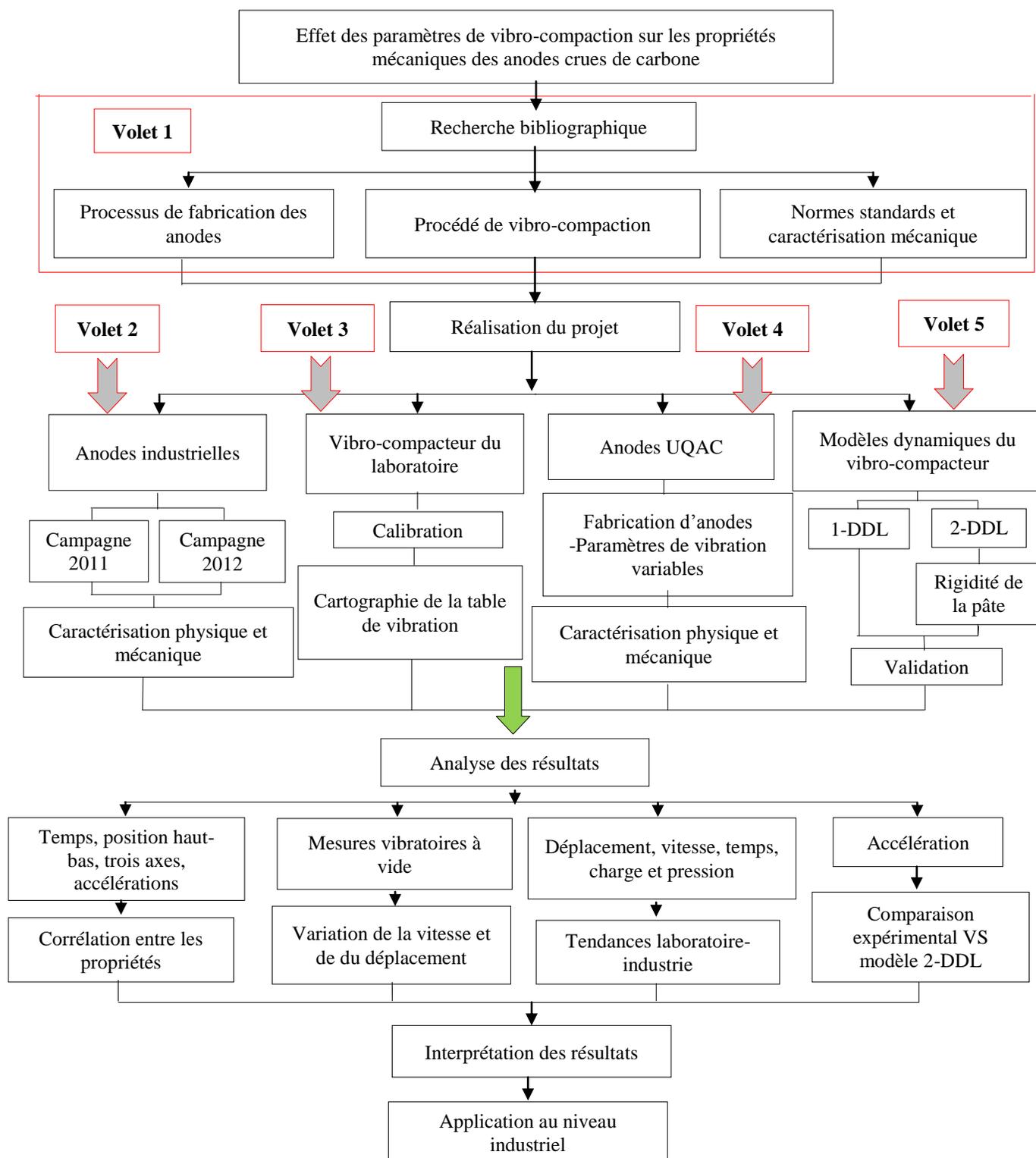


Figure 1.9 : Organigramme de la méthodologie

1.5. Contenu de la thèse

La thèse est structurée comme suit :

Le chapitre un porte sur une introduction générale du projet de même que la problématique de cette étude. Par la suite, les objectifs spécifiques et généraux sont définis et la méthodologie du travail est expliquée.

Le chapitre deux est porté sur la revue de littérature qui est divisée en trois sections. Le procédé de fabrication des anodes, le procédé de vibro-compaction et les normes standards et caractérisation mécaniques.

Le chapitre trois présente les résultats de l'étude vibratoire et de la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des anodes crues industrielles. La méthodologie et les procédures des essais sont expliquées en détail. Les résultats sont présentés en utilisant les méthodes d'analyse statistique permettant ainsi de mieux expliquer la variabilité des données.

Le quatrième chapitre expose la conception et la calibration du vibro-compacteur de laboratoire en se basant sur les données de la littérature de même que celles obtenues au chapitre trois concernant les vibro-compacteurs industriels. Des problèmes de conception et de fabrication ont été détectés suite aux analyses vibratoires.

Le chapitre cinq présente l'étude vibratoire et la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des anodes du laboratoire. Cette section est portée sur l'effet de la variation du déplacement, de la vitesse, du temps de la charge et de la pression de charge sur la qualité des anodes crues produites.

Le sixième chapitre comporte le développement de modèles dynamiques du vibro-compacteur. En premier lieu un modèle à un degré de liberté est développé afin de valider l'approche et la méthodologie à utiliser dans le cas de systèmes complexes. Par la suite un modèle à deux degrés de liberté est développé et validé en utilisant des données de la littérature. Pour finir avec un modèle optimisé à deux degrés de liberté du vibro-compacteurs permettant de simuler au mieux les accélérations de la table avec celles de la tige. Dans le cas de ces modèles à deux degrés de liberté, la rigidité de la pâte a été prise en considération et mesurée expérimentalement.

Pour finir, le chapitre sept est porté sur les conclusions et les recommandations pour des travaux futurs.

1.6. Conclusions

Le procédé de vibro-compactation représente une étape assez complexe créant beaucoup de problèmes durant la fabrication des anodes. Cette étude va permettre de mieux comprendre ce procédé et ainsi faire le lien entre les paramètres de vibro-compactation et les propriétés mécaniques des anodes crues. Ce projet a été réalisé sur des anodes crues afin de pouvoir faire le lien avec le procédé de vibro-compactation. En général une bonne anode crue donne une bonne anode cuite, mais des fois ça ne tient pas. Une anode crue de très haute densité peut avoir beaucoup de fissures après cuisson. Donc, l'étude est à poursuivre afin d'approfondir le lien entre les résultats de cette étude et les anodes cuites.

La méthodologie de ce travail est basée simultanément sur des approches expérimentales à l'échelle industrielle et du laboratoire ainsi qu'analytiques. Les résultats

obtenus vont permettre d'améliorer ce procédé et aussi la qualité des anodes afin de pouvoir mieux diagnostiquer les vibro-compacteurs avec des mesures vibratoires.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Introduction

Pour avoir une idée générale sur les travaux les plus récents qui se rapportent à cette présente étude, la revue de littérature de ce domaine d'étude est passée en revue. Au départ, la première section résume les travaux portant sur les matières premières, les améliorations au niveau du processus de malaxage ainsi la caractérisation des propriétés de la pâte d'anode. Par la suite l'intérêt est porté aux vibro-compacteurs ainsi que leurs mécanismes de fonctionnement, les effets des paramètres de vibro-compaction sur la qualité des anodes et les modèles dynamiques de vibro-compacteurs. La dernière section de cette étude est consacrée aux différentes normes d'essais standard ASTM et ISO et aussi à la caractérisation mécanique des anodes et de la cathode.

2.2. Processus de fabrication des anodes

Plusieurs éléments interviennent durant la fabrication des anodes au niveau de la tour à pâte. Les matières premières se retrouvent au premier niveau de ce procédé. Par la suite c'est le processus de malaxage où la pâte d'anode est formée avant de passer au processus de vibro-compaction.

2.2.1. Matières premières

Plusieurs travaux sont publiés sur les matières premières utilisées durant la fabrication des anodes que ce soit sur le coke [32, 33, 34, 35, 36, 37] ou sur le brai [38, 39, 40] afin d'améliorer la qualité des anodes produites. Les variations dans les propriétés des matières premières sont l'un des nombreux critères qui permettent l'obtention d'anodes de qualité. Azari *et al.* [41] ont travaillé sur l'optimisation des matières premières et du procédé de fabrication des anodes. Cette étude a permis de préciser les indices influant sur la qualité des anodes. Un test de compression a permis de mesurer la compactibilité de la pâte d'anode. Les résultats obtenus ont démontré la variation de la résistance à la compression avec la variation du type de coke utilisé. Haifei *et al.* [42] ont amélioré la densité des anodes cuites de 1,58 à 1,60 g/cm³ en travaillant sur la composition des produits broyés (ball mill product). Plusieurs recherches sont aussi publiées sur l'optimisation du processus dynamique de la tour à pâte [43, 44, 45, 46, 47, 48]. Bühler *et al.* [49] ont amélioré la densité apparente ainsi que la perméabilité à l'air des anodes cuites en diminuant le pourcentage de brai de 15 % à 13% en opérant avec des électrodes pilotes de pâte d'anode. Vaillancourt *et al.* [50] ont travaillé sur un système d'inspection des d'anodes en utilisant un logiciel de classification automatique. Ils ont développé six familles de défauts. Ce qui a permis de mieux classer l'origine des défauts des mégots d'anodes.

2.2.2. Malaxage

Par la suite, vient le processus de malaxage qui est une étape assez importante durant la fabrication des anodes. Le temps de malaxage, la vitesse de malaxage ainsi que la température de malaxage sont des paramètres très déterminants. Plusieurs travaux sont

effectués à ce niveau [51, 52, 53, 54, 55] parmi eux, le groupe industriel Aluminium Pechiney qui a apporté des modifications afin d'optimiser les températures de malaxage et de vibro-compaction (températures élevées) de la pâte d'anode. Azari *et al.* [56, 57, 58] ont travaillé sur la caractérisation des anodes crues par analyse tomographique aux rayons X. Les résultats des essais en laboratoire montrent moins de variation des propriétés si la pâte est mixée à une température de 178 °C pour 10 minutes.

2.2.3. Pâte

Une fois que le procédé de malaxage est achevé, une pâte d'anode avec un comportement assez spécial est obtenue. Lorsque cette dernière est chauffée pour des températures allant de 150 à 180 °C, elle a un comportement viscoplastique. En effet, à chaud, c'est possible de la prendre dans la main et de la presser, le résultat sera une poignée de pâte d'anode ayant la forme de l'intérieur de la main. Cependant, lorsqu'elle devient froide, elle devient friable et non malléable. Sur ce, récemment plusieurs études portent sur la caractérisation des propriétés de la pâte d'anode à chaud. Chaouki *et al.* [59] ont travaillé sur la simulation de la compaction de la pâte d'anode en utilisant une loi de comportement non linéaire viscoplastique. Cette loi permet de prédire le comportement mécanique de la pâte durant la compaction. Les résultats obtenus montrent que la simulation suit bien les tests expérimentaux effectués dans un moule sous pression.

Afin de pouvoir identifier une loi du comportement mécanique de la pâte d'anode, Thibodeau *et al.* [60] ont établi une méthode de caractérisation des propriétés mécaniques de cette pâte d'anode à chaud en laboratoire. Les résultats des tests de compaction dans un

moule flexible en laboratoire de la pâte d'anode ont montré qu'après 75 secondes d'essai, les contraintes axiales et tangentielles deviennent soumises à de fortes augmentations. Le modèle viscoplastique développé semble être en mesure de prédire avec précision le comportement mécanique de la pâte. D'autres études faites par Thibodeau *et al.* [61] ont montré que lorsque la pâte atteint un certain niveau de compression, un squelette semi-rigide se forme et engendre ainsi une augmentation de la force axiale. Le montage de l'essai est présenté à la figure 2.1. Avant d'atteindre ce niveau de compaction, la force axiale appliquée est principalement dissipée par la déformation permanente de la pâte. C'est pour cette raison que les contraintes axiales et tangentielles augmentent à ce niveau. Gauthier *et al.* [62] ont fait une caractérisation des propriétés de la pâte d'anode en laboratoire par analyse d'images. Azari *et al.* [63, 64] ont étudié l'influence des caractéristiques ainsi que le facteur de forme du coke sur la compaction de la pâte d'anode. Leurs résultats ont montré que la porosité ainsi que le facteur de forme sont nécessaires afin de prédire la densité de l'anode finale non pas seulement le test de la densité en vrac.



Figure 2.1 : Montage de l'essai de caractérisation de la pâte à chaud [61].

Aryanpour *et al.* [65] ont travaillé sur l'évaluation de la sur-compaction de certains échantillons de pâte avec des recettes spécifiques. Une pression de 60 MPa est appliquée avec des taux de chargements variables pour chaque échantillon de pâte à l'aide d'une presse. Les résultats obtenus montrent que la densité apparente ne dépend pas nécessairement du taux de chargement tel que représenté à la figure 2.2. Cette étude a permis d'établir une relation analytique reliant la densité apparente crue à la pression axiale appliquée. D'autres études ont été faites sur la caractérisation des propriétés mécaniques de la pâte d'anode ainsi que la pâte à brasque [61, 66, 67, 68]. Les résultats des tests effectués par Qingcai *et al.* [69] ont révélé que des bulles de haute pression se forment à l'intérieur de la pâte durant le procédé de vibro-compaction. Ces bulles peuvent engendrer la formation des fissures dans les blocs d'anodes. Afin de remédier à ce problème, l'utilisation du vacuum ainsi des pressions de charge élevées est suggérée dans cette étude. Cependant, la pression de charge joue aussi un rôle important au niveau du maintien de la vibration dans la bonne phase entre la tige et la table du vibro-compacteur.

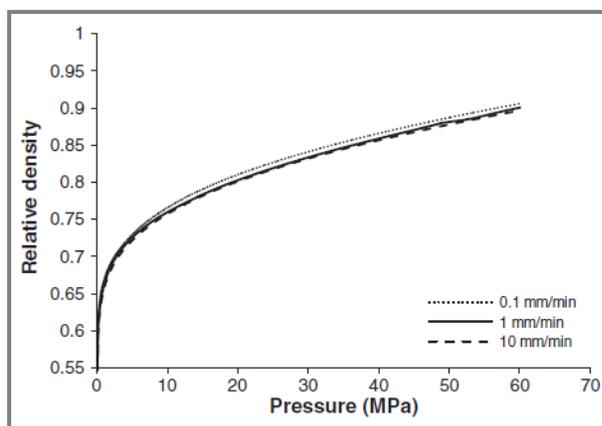


Figure 2.2 : Effet du taux de chargement sur la densité apparente d'anode crue [65].

2.3. Procédé de vibro-compaction

Dans cette section, l'équipement le plus souvent utilisé pour dans ce procédé qui est le vibro-compacteur est présenté de même que son mécanisme de fonctionnement. Par la suite, les effets de la variation des paramètres de vibro-compaction sont présentés. Pour finir, les modèles de vibro-compacteurs existant dans la littérature sont présentés.

2.3.1. Vibro-compacteurs et mécanismes de fonctionnement

Il existe plusieurs types de vibro-compacteurs avec différentes dispositions. Ils peuvent être des unités simples, doubles ou des systèmes tournants [70]. Des modèles de vibro-compacteurs à unité simple et à système tournant sont présentés respectivement à la figure 2.3. Ils sont principalement constitués d'une table vibrante reposant sur des amortisseurs, d'un moule à pâte d'anode ainsi qu'un couvercle comprenant un système de charge qui aide à compacter la pâte d'anode. Au-dessous de la table vibrante se situe le balourd qui est entraîné en rotation par un moteur avec une certaine fréquence d'excitation permettant ainsi au système de vibrer. La figure 1.8 présentée au chapitre 1 illustre un schéma résumant les principaux éléments constituant un vibro-compacteur. Actuellement, la plupart des vibro-compacteurs comprennent aussi un système de vacuum pour permettre le vide pendant la compaction. Ce système donne un meilleur rendement. Avec l'utilisation d'un vacuum, la densité apparente des anodes crues augmente de $0,02 \text{ g/cm}^3$ et la densité apparente après cuisson augmente de $0,015 \text{ g/cm}^3$. Une amélioration de la porosité des anodes cuites survient aussi lors de l'utilisation du vacuum [71].

Lors de la mise en marche du vibro-compacteur, le moule est fixé à la table vibrante et l'ensemble des vibrations se propage sous le couvercle qui est abaissé librement sur la pâte. Après que le niveau de densification souhaité est atteint avec un certain temps de vibration, le moule est ensuite séparé de l'assemblage vibratoire et le bloc d'anode fini est poussé latéralement hors du moule. La disposition des éléments constituant un vibro-compacteur peut varier d'un appareil à un autre. La figure 2.4 présente deux types de vibro-compacteurs avec une position différente du balourd [10]. La meilleure disposition, c'est d'avoir le balourd au-dessous du moule d'anode, non pas au-dessus. De plus grandes vibrations surviennent lorsque le balourd est placé au-dessus du moule ce qui conduit à l'utilisation de beaucoup plus d'amortissement.

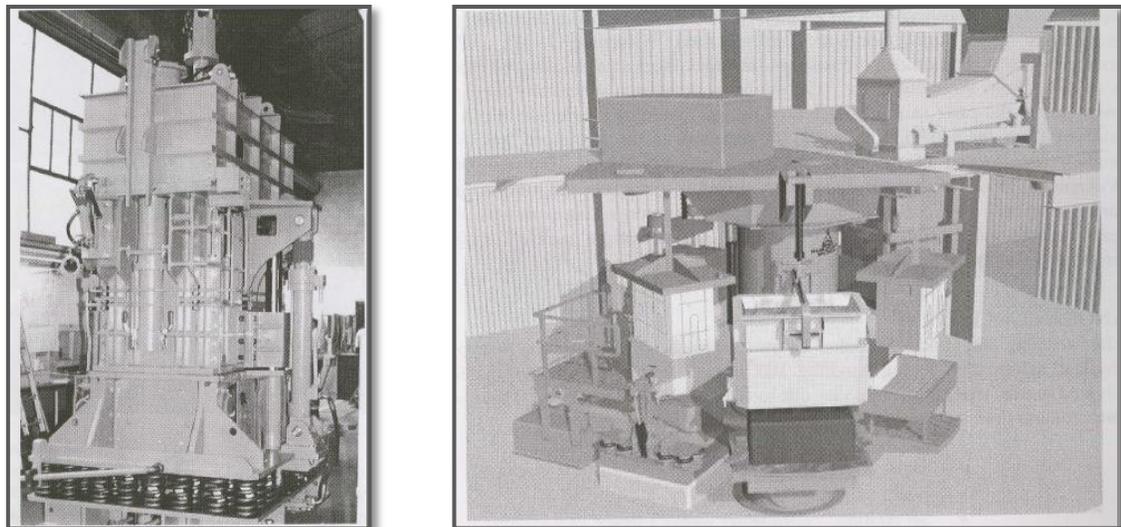


Figure 2.3 : Vibro-compacteurs à unité simple et à système tournant [70].

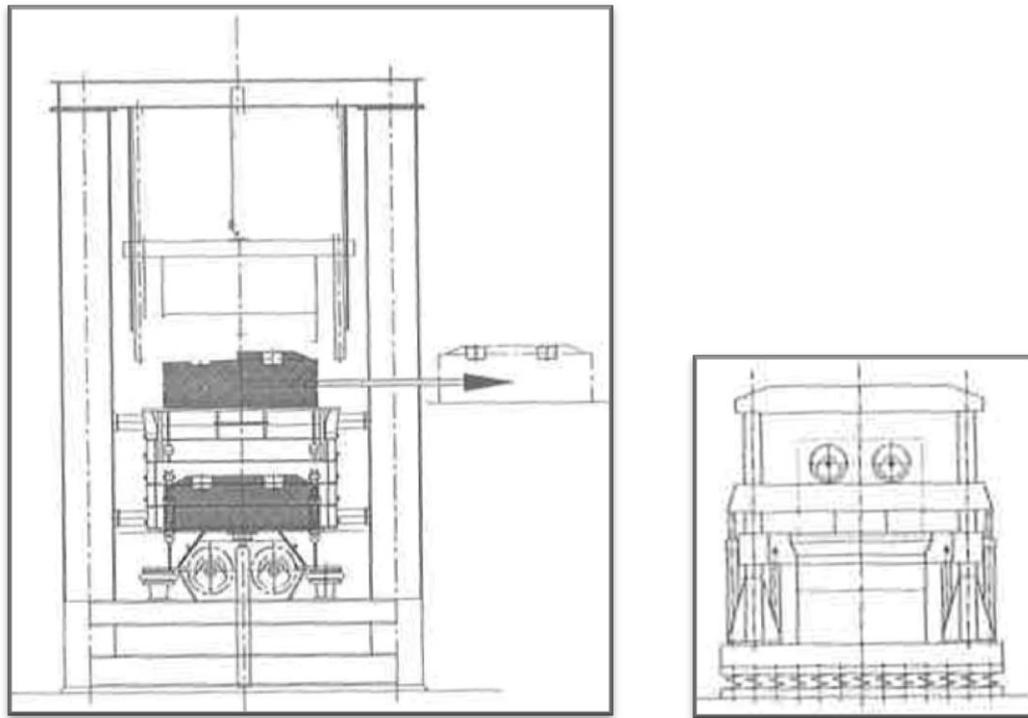


Figure 2.4 : Différentes dispositions du balourd des vibro-compacteurs [10].

Table vibrante

La table vibrante représente un des éléments les plus importants constituant un vibro-compacteur. Au fil du temps, les isolations vibratoires de la table ont changé tel que présenté à la figure 2.5. Pendant les premiers stades du développement des tables vibrantes, les isolations vibratoires étaient représentées par des ressorts rigides en acier. Plus tard, ces ressorts ont été remplacés par des blocs de caoutchouc rigides. Maintenant, ce sont des coussins d'air comprimé en caoutchouc gonflable qui sont utilisés. Ces derniers offrent :

- Une réduction de 50 % au niveau des forces dynamiques appliquées au sol.
- Une durée de vie plus longue que les anciens modèles.
- Des facilités d'ajustement au niveau de la rigidité selon les types de pâte utilisée.
- Une réduction du bruit émis.

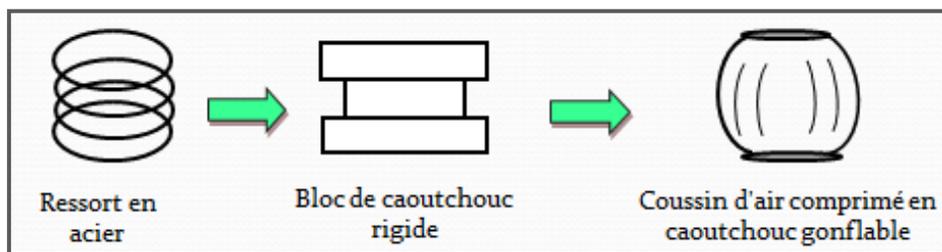


Figure 2.5 : Évolution des isolateurs vibratoires au fil du temps.

Les vibro-compacteurs sont constitués aussi de quatre contrepoids excentriques qui se situent sur deux arbres. Ces derniers doivent être dans la même direction pour assurer que toutes les forces sont dans le sens vertical et de sorte que le mouvement vibratoire soit en équilibre. Les contrepoids peuvent être utilisés pour augmenter ou diminuer l'amplitude de la force de vibration en variant l'angle du balourd. Les vibrations de la table vibrante sont largement influencées par la calibration des angles des contrepoids excentriques. Un schéma représentatif des contrepoids excentriques est présenté à la figure 2.6.

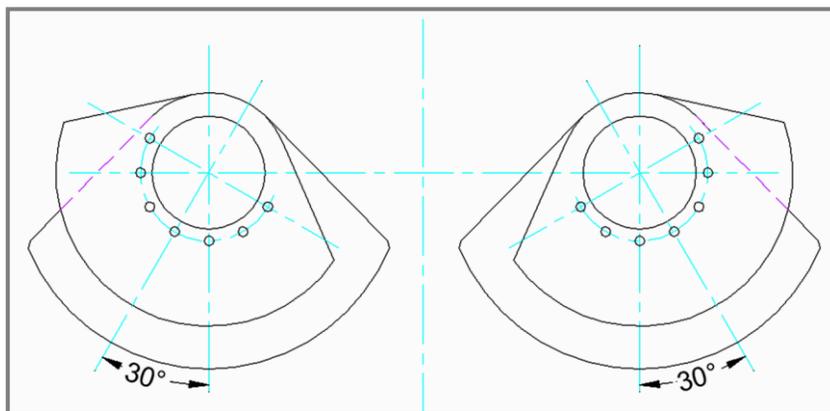


Figure 2.6 : Schéma représentatif des contrepoids excentriques.

Avantages et inconvénients

L'utilisation des vibro-compacteurs présente des avantages ainsi que des inconvénients. Les avantages du procédé de vibro-compaction sont [70] :

- Une température de formation élevée (140 °C à 170 °C).
- Une meilleure résistivité électrique.
- Propriétés mécaniques plus élevées.
- Plus adaptés pour les grandes anodes.
- Une meilleure organisation des particules.

Les inconvénients sont :

- Plus faible débit de formation d'anodes.
- Opération très bruyante.
- Une plus grande maintenance.

Comparaison entre vibro-compacteur et presse

Une comparaison des propriétés des anodes pressées et vibrées est présentée dans le tableau 2.1 d'après les études réalisées par Hulse [70]. Les propriétés obtenues pour les anodes qui sont vibrées sont meilleures que celles qui sont pressées. De plus, les anodes vibrées donnent de meilleurs résultats en salles de cuves [72].

Tableau 2.1 : Comparaison entre les propriétés des anodes pressées et vibrées [70].

Propriétés	Unités	Anodes pressées	Anodes vibrées
Densité apparente crue	g/cm ³	1,615	1,62
Densité apparente cuite	g/cm ³	1,565	1,572
Résistivité électrique	μΩm	59	55
Résistance à la flexion	MPa	9	11
Résistance à la compression	MPa	40	43

2.3.2. Effets des paramètres de vibro-compaction

Lors du processus de vibro-compaction, différents paramètres peuvent être étudiés entre autres :

- Le temps de vibration.
- La vitesse de vibration.
- La force de vibration.

Le tableau 2.2 [70] présente la variation des paramètres de vibro-compaction utilisés dans le monde entier. Cette étude est basée sur les données de différentes usines. Les résultats montrent qu'en moyenne la température de la pâte utilisée est de 149 °C pour un temps de vibro-compaction moyen de 62 secondes à des vitesses moyennes de vibration de 1465 RPM. La moyenne de la force de vibration utilisée est de 220 kN pour un débit de formation de 25 anodes par heure. Dans les données de cette étude, 24 % des usines utilisent un vacuum lors du processus de vibro-compaction. Le poids moyen des anodes formées est de 953 kg.

Tableau 2.2 : Paramètres de vibro-compaction utilisés dans le monde entier [70].

Variabes	Unités	Minimum	Maximum	Moyenne
Température de la pâte	°C	130	163	149
Débit de vibro-compaction	Anodes/hr	8	41	25
Temps de vibration	s	35	100	62
Vitesse de vibration	RPM	1200	1700	1465
Force de vibration	kN	131	319	222

Temps de vibration

Une série de tests standardisés [70] est effectuée sur des anodes afin de voir l'influence du temps de vibration sur les différents paramètres. Les essais sont effectués sur des anodes contenant entre 15 à 18 % de brai à des intervalles de vibration de 30, 60, 120 et 240 secondes. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 2.3 et au tableau 2.4.

Tableau 2.3 : Influence du temps de vibration sur la qualité des anodes (15 et 16 % de brai) [70].

Paramètres	Unités	15 % brai				16 % brai			
		30	60	120	240	30	60	120	240
Temps de vibration	s	30	60	120	240	30	60	120	240
Densité apparente crue	g/cm ³	1,501	1,520	1,521	1,528	1,537	1,544	1,561	1,561
Densité apparente cuite	g/cm ³	1,451	1,463	1,463	1,472	1,486	1,489	1,514	1,504
Résistivité électrique	μΩm	80	75	76	75	71	70	66	68
Résistance à la compression	MPa	18,60	22,90	22,10	21,90	23,40	27,40	30,00	29,20
Module d'élasticité	GPa	2,50	3,20	2,10	2,80	3,00	3,70	3,60	3,70
Résistance à la flexion	MPa	4,40	5,20	5,10	5,40	6,50	6,50	7,90	7,30

Tableau 2.4 : Influence du temps de vibration sur la qualité des anodes (17 et 18 % de brai) [70].

Paramètres	Unités	17 % brai				18 % brai			
		30	60	120	240	30	60	120	240
Temps de vibration	s	30	60	120	240	30	60	120	240
Densité apparente crue	g/cm ³	1,564	1,580	1,580	1,587	1,588	1,594	1,598	1,600
Densité apparente cuite	g/cm ³	1,497	1,496	1,514	1,505	1,494	1,492	1,497	1,504
Résistivité électrique	μΩm	68	67	65	67	67	67	68	68
Résistance à la compression	MPa	27,80	30,60	26,50	28,70	29,50	30,00	28,00	27,00
Module d'élasticité	GPa	3,40	4,00	3,40	3,50	3,80	3,90	3,40	3,70
Résistance à la flexion	MPa	7,20	7,60	8,30	7,70	7,60	7,80	7,70	7,70

Une augmentation des propriétés mécaniques ainsi que de la densité apparente survient tout au long de l'augmentation du taux de brai contenu dans les anodes. Cependant, lorsque le temps de vibration augmente (plus de 60 secondes), la résistance en compression en générale diminue. Cela est dû à une sur-compaction avec possibilité de création de microfissures. Une diminution de la résistivité électrique apparait avec l'augmentation du taux de brai de 15 à 16 %, mais à partir de 17 et 18 %, la résistivité électrique reste invariable. Les temps optimums de vibro-compaction pour cette étude étaient de 60 s pour un taux de brai de 15 % et 18 %, de 120 s pour un taux de brai de 16 % et 17 %.

La figure 2.7 présente la variation de la densité apparente des anodes crues en fonction du temps de vibration [70]. Avec l'augmentation du temps de vibration de 50 à 240 secondes, la densité apparente a augmenté de 1,588 à 1,612 kg/dm³.

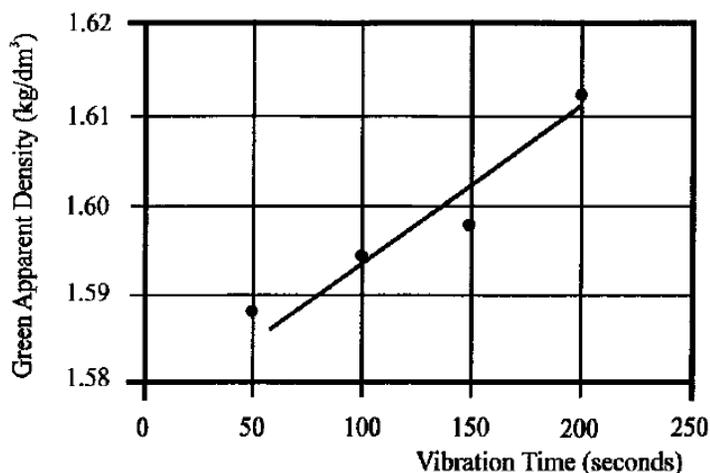


Figure 2.7 : Influence du temps de vibration sur la densité des anodes crues [70].

Tkac [73] a aussi étudié l'influence de la variation du temps de vibration. En augmentant le temps de vibration, la résistance à la compression ainsi que le module de Young varie seulement lorsque le temps de malaxage est égal à une minute comme présenté à la figure 2.8 et à la figure 2.9. La figure 2.10 présente la variation de la résistivité électrique en fonction du temps de vibration. Lorsque le temps de malaxage est égal à une minute, avec l'augmentation du temps de vibration, la résistivité électrique diminue. Par contre, dans le cas du temps de malaxage de six minutes, avec l'augmentation du temps de vibration la résistivité électrique ne varie pas beaucoup. La figure 2.11 présente une augmentation nette de la densité apparente avec l'augmentation du temps de vibration ainsi que pour le temps de malaxage. Gao *et al.* [74] ont fait d'autres travaux sur la détermination du temps optimal de vibro-compaction en suivant le mouvement d'une barre attachée au couvercle du vibro-compacteur. Lorsque la barre arrête de descendre, le temps optimal est atteint.

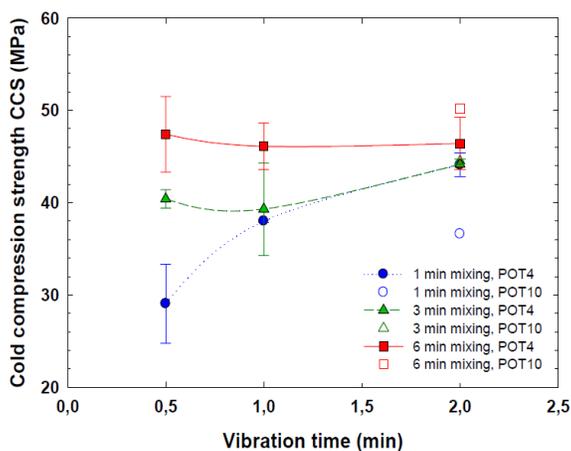


Figure 2.8 : Influence du temps de vibration sur la résistance à la compression [73].

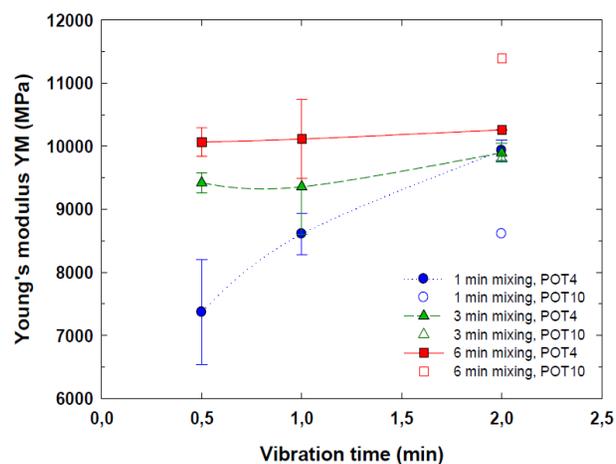


Figure 2.9 : Influence du temps de vibration sur le module de Young [73].

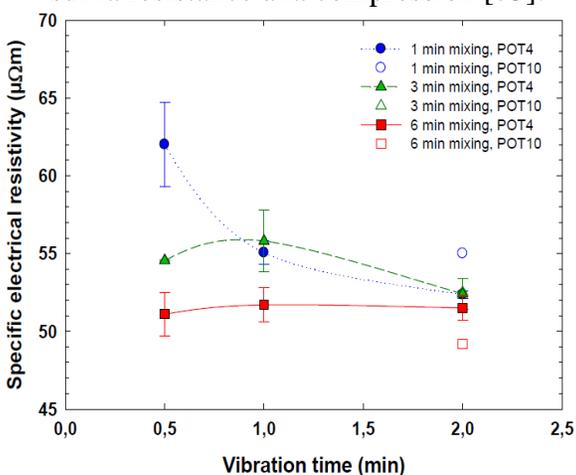


Figure 2.10 : Influence du temps de vibration sur la résistivité électrique [73].

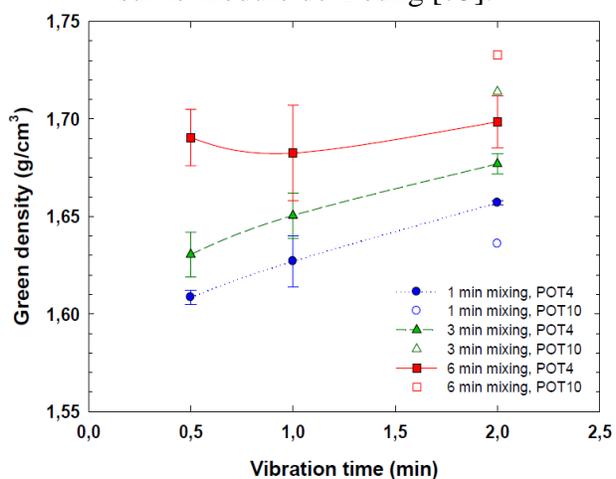


Figure 2.11 : Influence du temps de vibration sur la densité apparente [73].

Vitesse de vibration

Une analyse des données de l'usine [70] de production d'anodes démontre que la qualité des anodes augmente généralement avec l'augmentation de la vitesse de vibration. La figure 2.12 et la figure 2.13 montrent que la résistance en compression ainsi que la densité apparente augmentent avec l'augmentation de la vitesse de vibration. D'autres

recherches faites par Sandvik [75] à la figure 2.14 montrent aussi qu'en augmentant la vitesse de vibration, la densité apparente des anodes crues augmente.

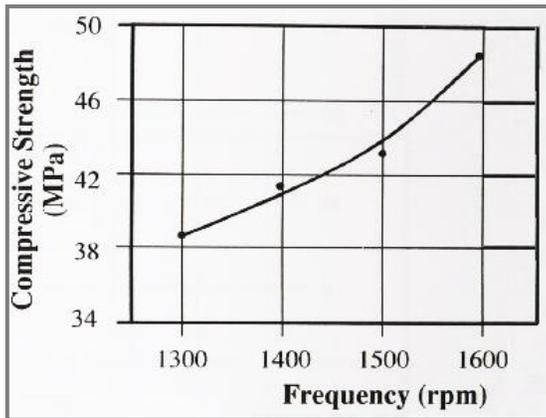


Figure 2.12: Résistance à la compression en fonction de la fréquence de vibration [70].

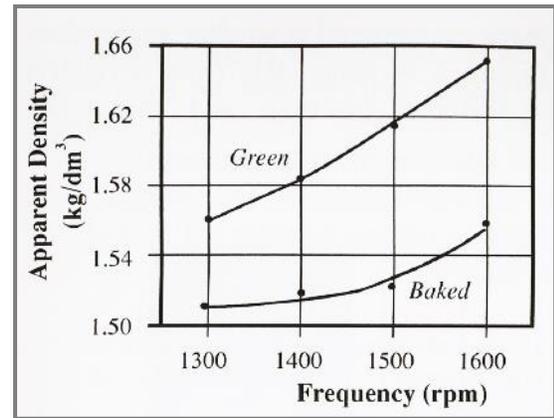


Figure 2.13 : Densité apparente en fonction de la fréquence de vibration [70].

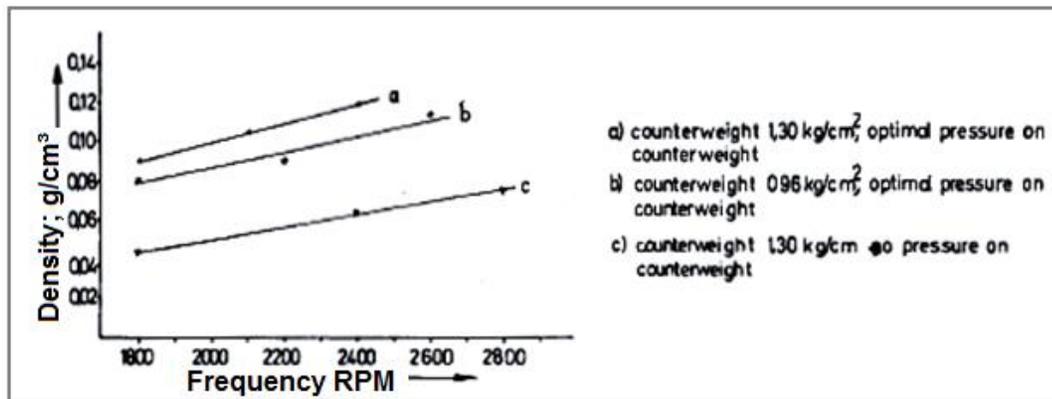


Figure 2.14 : Variation de la densité apparente en fonction de la vitesse de vibration [75].

Force de vibration

La force maximale de vibration se produit lorsque l'angle des contrepoids du balourd est à 0°. À l'angle de 180°, la force de vibration est minimale. La force augmente avec l'augmentation de la vitesse pour les mêmes positions angulaires des contrepoids. Dans le cas des petits angles, la différence entre les forces pour différentes vitesses est plus

exagérée comparée aux grands angles. Ceci est illustré dans la figure 2.15 en utilisant les données du manuel de l'utilisation du vibro-compacteur (KHD) [70]. Les différentes positions des contrepoids et des angles sont présentées dans la figure 2.16.

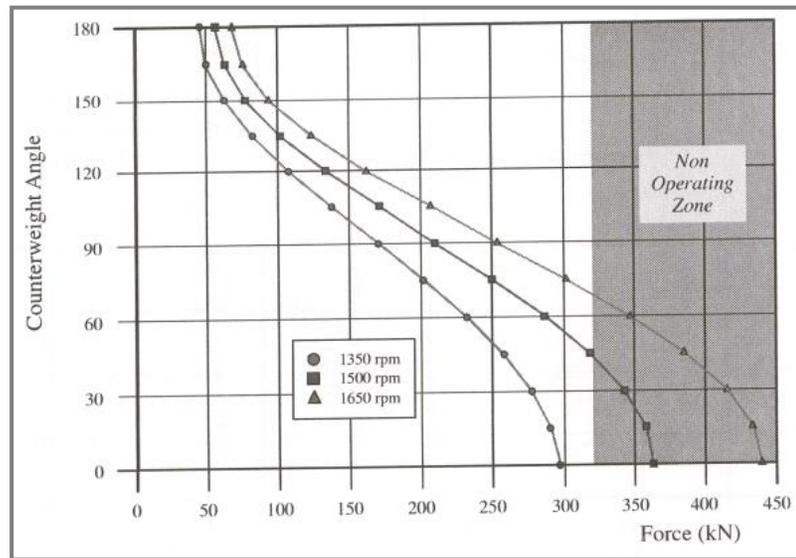


Figure 2.15 : La force en fonction de l'angle et de la vitesse de vibration [70].

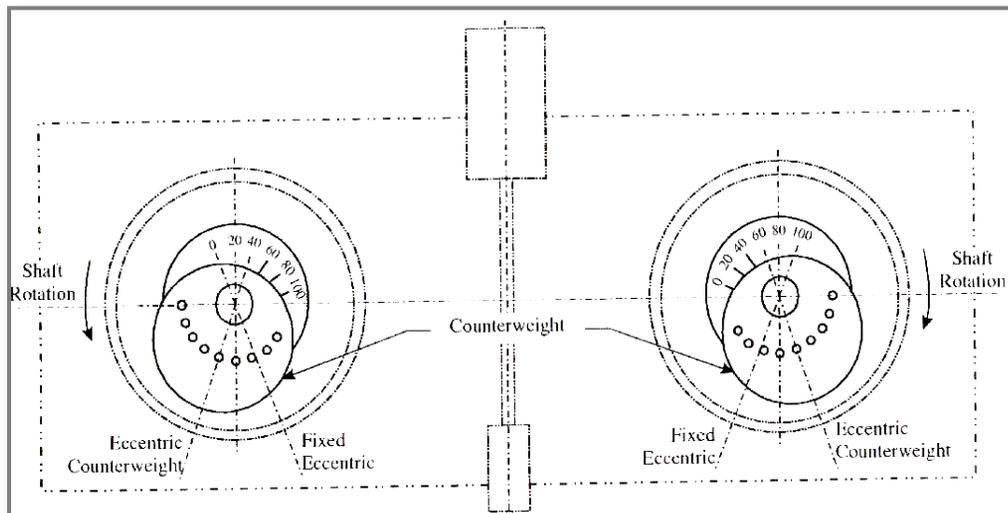


Figure 2.16 : Distribution des contrepoids sur le vibro-compacteur [70].

Avec l'augmentation de l'angle du balourd à la figure 2.17 de 90 ° à 135 °, la densité apparente a diminuée et avec l'augmentation de la force de vibration à la figure 2.18, la densité apparente a augmenté pour différents cas de charge avec et sans pression de charge [75].

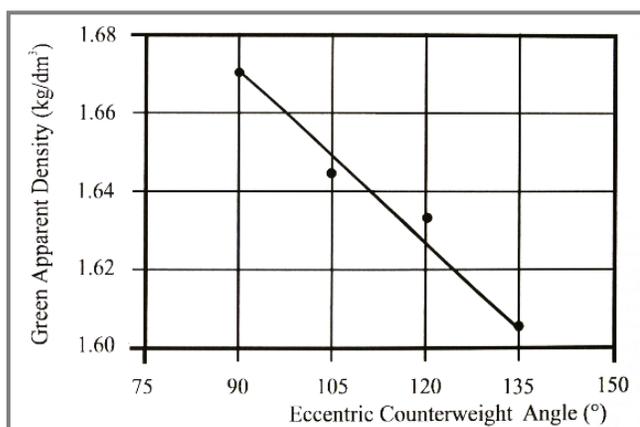


Figure 2.17 : Variation de la densité apparente en fonction de l'angle des contrepoids excentriques [70].

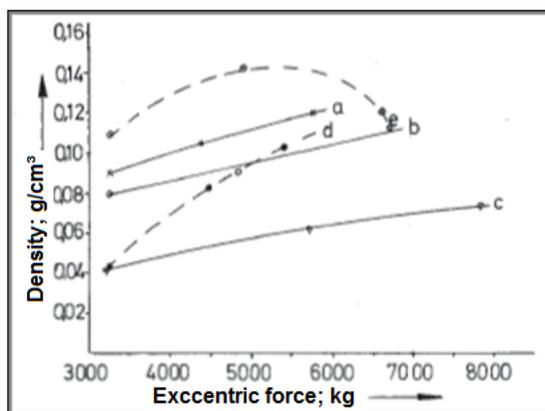


Figure 2.18 : Variation de la densité apparente en fonction de la force de vibration [75].

2.3.3. Modèle dynamique du vibro-compacteur

Afin de pouvoir mieux comprendre le processus de vibro-compaction, une modélisation mathématique du mouvement réel du vibro-compacteur a été réalisée. Les modèles dynamiques de vibro-compacteurs existant dans la revue de littérature sont présentés dans cette section. Afin d'optimiser encore plus le processus de vibro-compaction, Vincent *et al.* [76] ont développé un modèle numérique du vibro-compacteur. Ce modèle permet de prédire la densité des anodes crues pour une pâte donnée en variant les paramètres de vibro-compaction. Le modèle, qui est monodirectionnel (1-D), est une combinaison d'éléments de base et composé d'un ressort et d'un amortisseur. Le modèle

représentatif de ce vibro-compacteur est présenté à la figure 2.19. Les données d'entrée du modèle sont :

- Géométrie et masse des différents composants : table vibrante, moule, couvercle, bloc d'anode.
- Raideur des suspensions de la table (ressorts).
- Valeurs du couple de force et de la vitesse de rotation des contrepoids du balourd.
- Pression appliquée sur l'anode.
- Temps de vibro-compaction.
- Caractéristiques de la pâte: Module de Young, coefficient de Poisson, limite élastique.

Les données de sortie du modèle sont :

- Modes de vibration du vibro-compacteur.
- Mouvements de chaque composant (déplacement, vitesse et accélération).
- Pression de la pâte sur les parois du moule.
- L'énergie de vibration totale et l'énergie absorbée par la pâte.
- L'évolution de la densité de l'anode crue pendant le compactage.

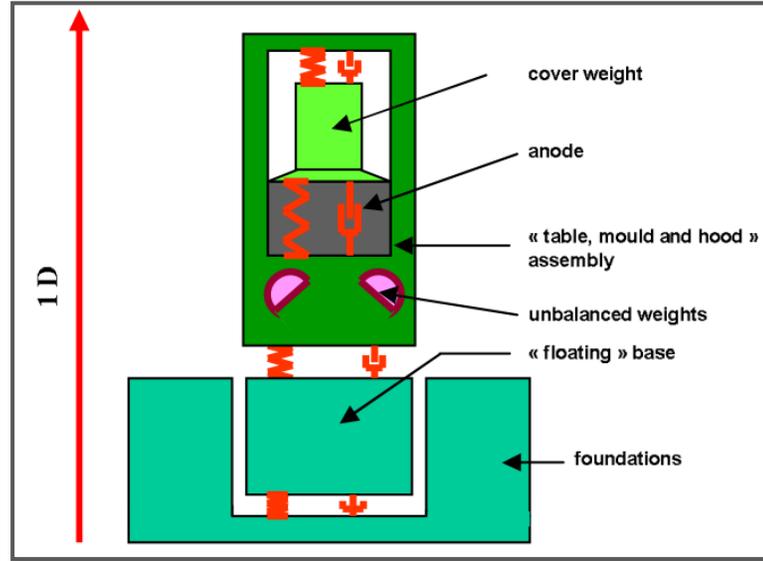


Figure 2.19 : Modèle numérique 1-D du vibro-compacteur [76].

D'un autre côté, Gates [77] a modélisé le vibro-compacteur par deux masses suspendues par des ressorts et des amortisseurs. La première masse représente le poids de l'anode et celui du moule. La deuxième masse représente le poids du couvercle. La figure 2.20 présente le modèle en question. La force de rotation $F(t)$ des masses excentrées est remplacée par une force de vibration verticale.

$$F(t) = c\omega^2 \sin \omega t \quad (2.1)$$

Avec :

$$c = 2mR \quad (2.2)$$

m : masse excentrique.

R : rayon excentrique.

ω : vitesse de rotation angulaire.

$F(t)$: force d'excitation.

Dans une autre étude effectuée par Paskota [78], le mouvement du vibro-compacteur est modélisé par le mouvement d'une balle bondissante. La figure 2.21 présente le mouvement modélisé du vibro-compacteur. Le mouvement de la table vibrante est représenté comme suit :

$$y(t) = a \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

$y(t)$: déplacement de la table vibrante pour un temps t .

a : amplitude.

ω : fréquence de vibration.

La méthode proposée dans cette étude n'est pas vraiment une méthode de contrôle pratique prête pour la mise en œuvre dans l'industrie, mais plutôt une étude théorique et abstraite. Cependant, les résultats obtenus montrent l'importance du lien entre la théorie et la pratique, en invitant d'autres recherches de systèmes dynamiques. Ce modèle montre que la théorie des systèmes dynamiques peut être utile dans la pratique si elle est utilisée dans le droit chemin.

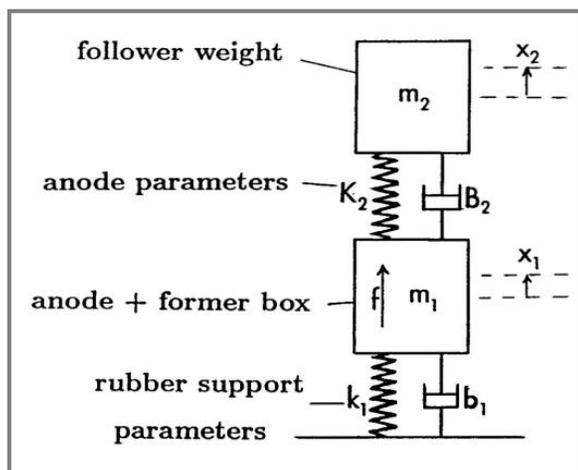


Figure 2.20 : Représentation du modèle mathématique [77].

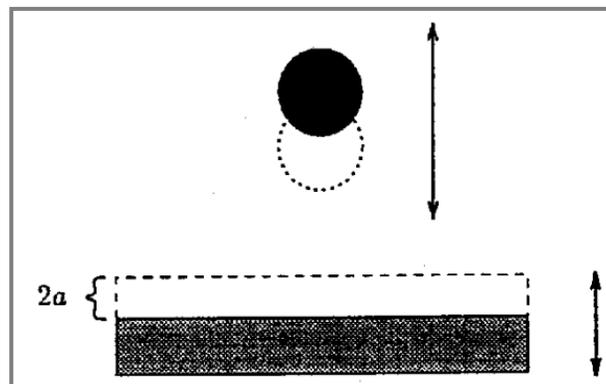


Figure 2.21 : Balle bondissante [78].

2.4. Normes standard et caractérisations mécaniques

Afin de pouvoir caractériser les propriétés mécaniques des anodes de carbone, plusieurs tests standards mécaniques (ASTM et ISO) peuvent être effectués. Dans cette section, un résumé des normes d'essais mécaniques est présenté ainsi qu'un résumé des travaux effectués au niveau de la caractérisation mécanique des anodes et de la cathode.

2.4.1. Tests mécaniques

Les tests mécaniques les plus souvent réalisés durant la caractérisation des propriétés des anodes ainsi que des cathodes sont entre autres, la flexion, la compression ainsi que la traction. Le test de flexion [26, 79] permet de mesurer le degré de résistance d'une matière à la flexion ou d'en mesurer la consistance. Dans cet essai, toute la charge est appliquée au niveau d'un point dans le cas de l'essai de trois points et au niveau de deux points dans le cas de l'essai de quatre points comme représenté respectivement à la figure 2.22 et à la figure 2.23. Ce test peut aussi être réalisé à des températures élevées [80]. Les résultats

obtenus durant cet essai peuvent servir à la détermination des propriétés des anodes précuites [81,82] et à prévenir la formation de fissure [83, 84]. Actuellement, il n'existe pas de test spécifique pour évaluer le choc thermique que les anodes peuvent subir durant leurs exploitations dans les cellules d'électrolyse, cependant des prédictions de résistance au choc thermique ont été faites en utilisant parmi les données d'entrée la résistance en flexion [85, 86, 87]. Avec le test de traction [88], la résistance en traction ainsi que les contraintes et les déformations peuvent être déterminées. La déformation à la rupture ainsi que le module de Young peuvent aussi être mesurés. La figure 2.24 représente l'appareillage de l'essai de traction.

Pour ce qui est du test de compression [27, 28], la plus grande force appliquée est enregistrée et utilisée pour calculer la résistance à la compression. Ce test peut être effectué dans une seule direction ou dans les trois directions [89, 90]. La figure 2.25 représente le test de compression uniaxiale. Ce matériau peut supporter de grandes charges en mode compression par rapport aux autres modes de charge.

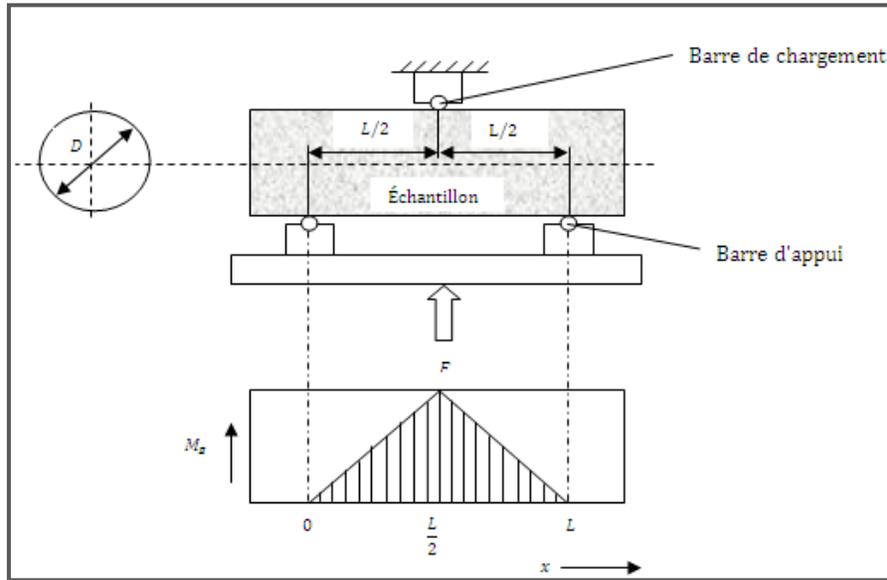


Figure 2.22 : Test de flexion à trois points (ISO 12986-1 : 2000) [26].

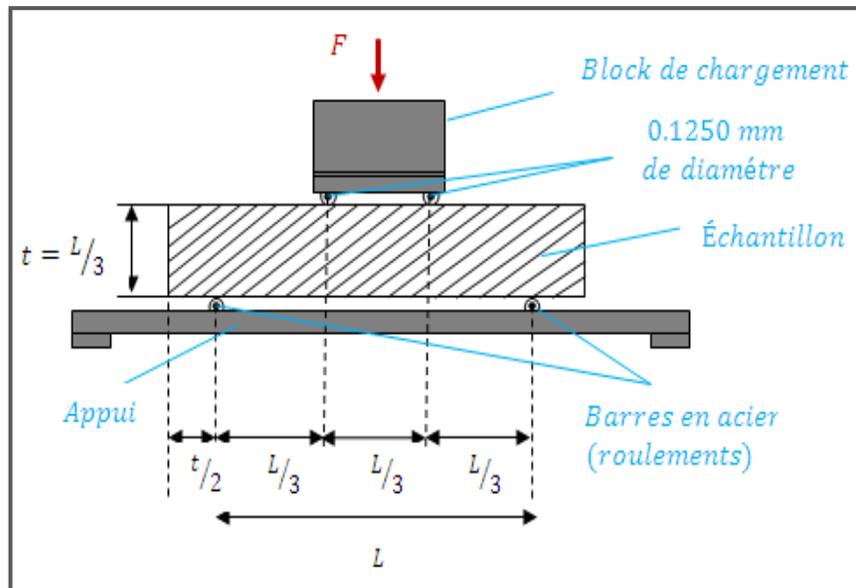


Figure 2.23 : Test de flexion à quatre points (ASTM C651-91 : 2005) [79].

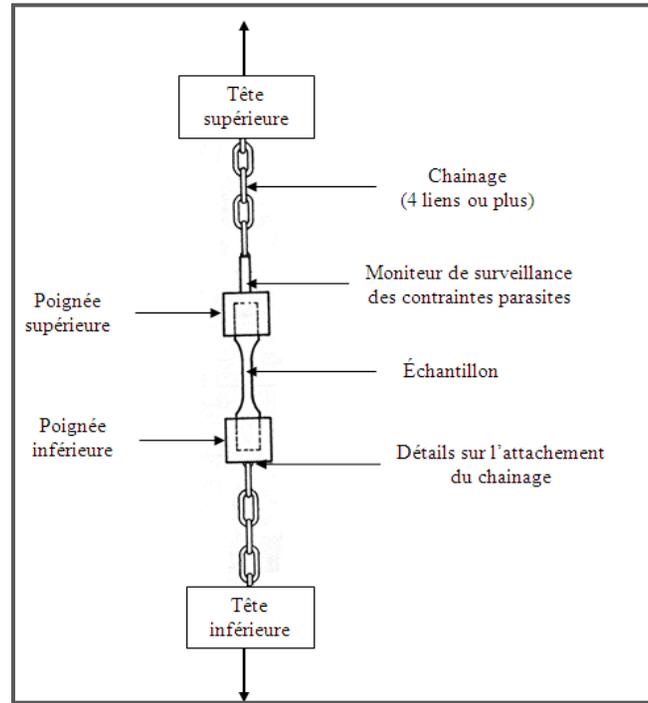


Figure 2.24 : Appareillage de l'essai de traction (ASTM C 749-08) [88].

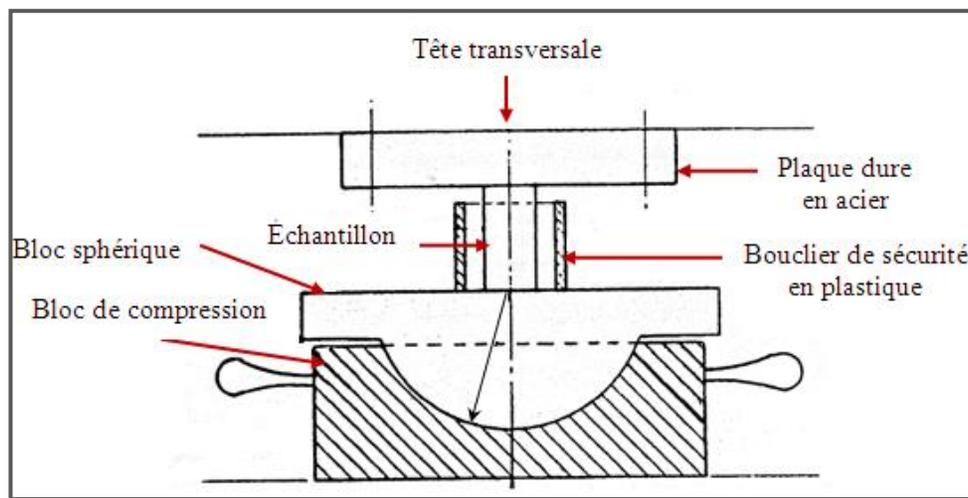


Figure 2.25 : Test de compression (ASTM C695-91 : 2005) [27]

2.4.2. Caractérisation mécanique des anodes et de la cathode

Il existe différentes stratégies d'échantillonnage d'une usine selon les besoins [91]. La valeur des données recueillies peut encore être considérablement diminuée dû au manque de discipline dans l'exécution de l'échantillonnage ou par la variation dans les méthodes de carottage. Andersen *et al.* [92] ont effectué une étude expérimentale sur un total de 504 échantillons afin d'étudier la propagation des fissures dans les anodes et de faire une caractérisation physique des propriétés des anodes. Les différents modèles d'échantillons d'essais sont présentés à la figure 2.26. En partant des analyses normales et de Weibull, la résistance à la rupture ainsi que la traction ont montré une dépendance claire à la température et au comportement orthotropique. Il a été constaté qu'à la fois les résistances à la rupture ainsi qu'à la traction augmentent avec la température et elles sont plus importantes pour les échantillons horizontaux que ceux qui sont verticaux. La variation de la résistance à la traction à l'intérieur de l'anode diminue avec la température, mais la variation de la déformation à la rupture augmente.

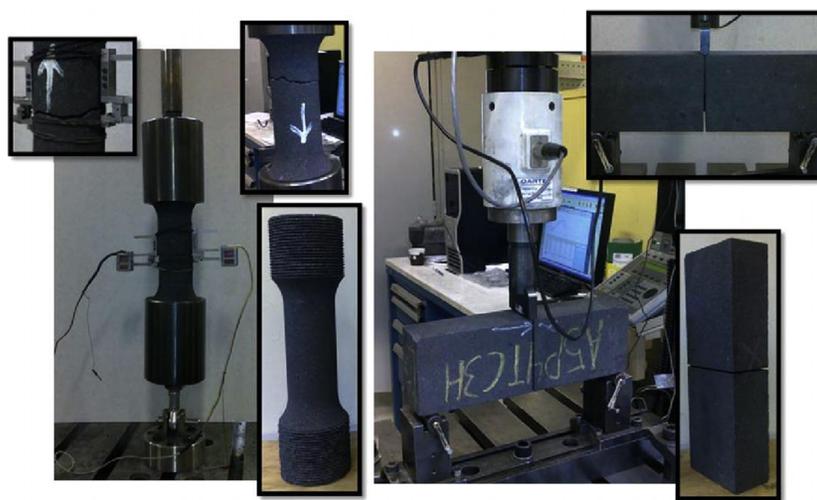


Figure 2.26 : Différents modèles des échantillons d'essais [92].

Perruchoud *et al.* [93] ont examiné des données de qualité des anodes de 60 usines de carbone. Les plages et les valeurs moyennes du mode et la variabilité des propriétés des anodes ont été déterminées et analysées. Le tableau 2.5 présente les moyennes et les écarts types (σ) des caractéristiques des anodes précuites. Les résistances à la flexion et à la compression varient respectivement entre 4 et 14 MPa et entre 30 et 60 MPa. Les anodes ont donc un comportement trois à quatre fois rigide en compression qu'en flexion.

Afin de modéliser le comportement thermomécanique de la pâte à brasquer, Richard *et al.* [94] ont réalisé des tests de compression uniaxiale de la température ambiante jusqu'à 400 °C. Une autre étude effectuée par Eliassen [95] est portée sur une cartographie des propriétés mécaniques constituant l'anode en effectuant des tests de flexion trois-points et de traction afin de mieux comprendre la propagation des fissures dans les anodes lors de leurs exploitations. Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la traction ainsi que du module de Young avec l'augmentation de la température.

Tableau 2.5 : Caractéristiques des anodes précuites dans le monde entier [93].

Propriétés	Unités	Normes	Moyennes dans le monde	
			Moyennes	2 σ
Densité apparente	kg/dm ³	ISO 12985-1	1,50-1,62	0,015-0,060
Résistivité électrique	$\mu\Omega\text{m}$	ISO 11713	51-74	2-20
Résistance à la flexion	MPa	ISO 12986-1	4-14	2-7
Résistance à la compression	MPa	ISO 18515	30-65	8-20
Module d'élasticité statique	GPa	RDC-144	3,0-6,5	1-2

Plusieurs études ont été faites sur la caractérisation des propriétés mécaniques de la cathode [96, 97]. En 2007, Bouzemmi *et al.* [98] ont travaillé sur la caractérisation du comportement thermomécanique de la cathode. La caractérisation mécanique a été effectuée en utilisant des essais mécaniques (traction uniaxiale, compression uniaxiale et triaxial) à des températures variables. Ils ont réalisé une modélisation du comportement élastoplastique d'endommagement des blocs cathodiques. Finalement, ils ont établi une prédiction du comportement de la cathode vis-à-vis de l'endommagement.

2.5. Conclusions

Plusieurs travaux ont été publiés sur l'amélioration de la qualité des anodes en travaillant sur les matières premières que ce soit sur le coke ou le brai. Les variations dans les matières premières représentent l'un des nombreux critères permettant l'obtention des anodes de qualité. Les travaux sur matières premières continus afin de trouver un optimum, car la qualité de ces dernières se dégrade au fil du temps.

Récemment plusieurs travaux ont été publiés sur la caractérisation du comportement de la pâte. Cependant, il n'existe pas de test spécifique permettant de valider la qualité de la pâte avant de passer au procédé de vibro-compaction.

Le procédé de vibro-compaction est un processus très complexe qui influe considérablement sur la qualité des anodes produites. Jusqu'à présent, il n'existe pas beaucoup d'études traitant ce sujet et en particulier l'influence des paramètres de vibro-compaction sur les propriétés mécaniques des anodes.

L'utilisation des vibro-compacteurs au lieu des presses hydrauliques durant la mise en forme des anodes montre bien un gain considérable des différentes propriétés qui à leurs tours influent sur les coûts de production. Les propriétés des anodes varient avec la variation des différents paramètres de vibration ainsi que la composition des matières premières. Ce qui incite à faire une étude paramétrique des différentes propriétés. Les modèles dynamiques de vibro-compacteur existant dans la revue de littérature montrent l'importance de faire des modèles reliant la théorie à la pratique.

Toutes les normes de tests mécaniques étudiées ont permis d'établir une méthodologie d'essai. Les détails sur les dimensions des échantillons, l'appareillage, la durée et la charge à appliquer ainsi que sur le calcul des différentes propriétés mécaniques sont étudiées pour chaque type d'essai.

CHAPITRE 3

ÉTUDE VIBRATOIRE ET CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES : ANODES INDUSTRIELLES

3.1. Introduction

Dans de but de pouvoir faire des caractérisations physiques et mécaniques des anodes industrielles, des tests de mesures des différentes propriétés des anodes ont été réalisés sur des anodes industrielles. Des mesures vibratoires sont aussi réalisées sur les vibro-compacteurs industriels afin de faire le lien entre les paramètres vibratoires et la qualité des anodes produites. Tous les tests de caractérisation sont réalisés sur des anodes crues pour directement faire la connexion avec le procédé de vibro-compaction qui est le but de cette étude.

Ce chapitre présente les travaux de deux campagnes de mesures faites en 2011 et 2012 sur des anodes crues industrielles. Ces anodes proviennent de quatre vibro-compacteurs industriels différents. En premier lieu, la méthodologie et les procédures des différents tests sont présentées. Ces derniers portent sur les résistances de flexion et de compression, la densité apparente, la résistivité électrique et les accélérations. Par la suite, ce sont les analyses des résultats de ces tests physiques et mécaniques ainsi que des mesures vibratoires qui seront présentés.

3.2. Méthodologie et procédure des essais

Afin de pouvoir faire la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des anodes crues industrielles, des séries de tests de flexion à trois points suivant la norme ISO 12986-1:2000 [26] ainsi que de compression uniaxiale ASTM C695-91 : 2005 [27] et ISO 18515:2007 (E) [28] sont effectués. Cependant, avant de faire ces tests destructifs, des mesures de densité apparente ainsi que de résistivité électrique ont été réalisées sur tous les échantillons suivant les normes ASTM D5502-00 : 2010 [29] et ASTM D6120-97 [30]. Ces mesures permettent d'avoir le plus de données possible qui peuvent aider à mieux interpréter les résultats des tests mécaniques. Les échantillons sont pris à des endroits différents de l'anode en respectant la norme d'échantillonnage [31].

3.2.1. Campagne de 2011

Durant la campagne de 2011, quatre anodes industrielles crues ont été testées physiquement et mécaniquement. Ces anodes ont été formées le même jour avec la même recette de pâte, mais dans différents vibro-compacteurs. Le temps de vibration est le même pour les quatre anodes. Donc, elles ont les mêmes caractéristiques des matières premières ainsi que des paramètres des procédés de malaxage et de vibro-compaction. La figure 3.1 présente le plan de carottage des quatre anodes crues de 2011. Ce plan de carottage comporte quatre groupes d'échantillons respectivement; en bas de l'anode, en haut de l'anode (hauteur rainure), au-dessous du trou de formage et entre les trous de formage. Les échantillons sont pris dans les trois directions X, Y et Z pour les groupes 1 et 2 sachant que l'axe des X représente la longueur de l'anode. L'axe Y est la largeur de l'anode et l'axe Z est la hauteur de l'anode. Les groupes 3 et 4 sont des échantillons selon l'axe Z. Au total,

quarante et un échantillons sont testés pour chacune de ces anodes. Le tableau 3.1 présente les positions des échantillons de la campagne de 2011.

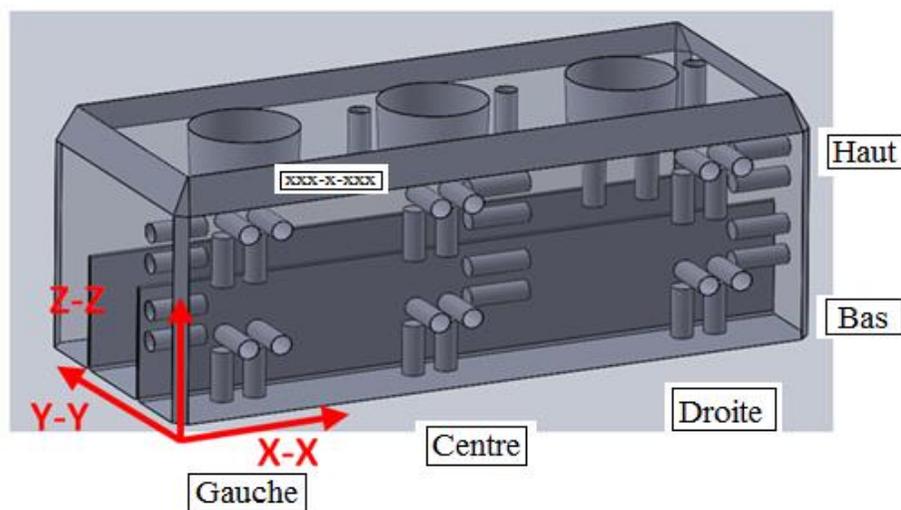


Figure 3.1 : Plan de carottage des quatre anodes crues-Campagne 2011.

Tableau 3.1 : Distribution des échantillons-Campagne 2011.

Échantillons	Axes	Positions	Nombres
Groupe 1	X, Y et Z	Bas de l'anode	18
Groupe 2	X, Y et Z	Haut de l'anode	18
Groupe 3	Z	Bas du trou	2
Groupe 4	Z	Entre les trous	3

Les échantillons des groupes 1, 2 et 3 ont été testés mécaniquement en alternance pour les tests de flexion et de compression puisque les tests mécaniques sont destructifs. Les échantillons du groupe 4 ont été testés en compression. Pour chaque groupe d'échantillons, des mesures de densité apparente et de résistivité électrique sont réalisées.

Tableau 3.3 : Correspondance des différents paramètres du tableau 3. 2.

Paramètre	Équivalent
T1	T2 - 7 sec
M2	M1- 12%
P2	P1 -10 psi
P3	P1 -15 psi
P4	P1- 20 psi
V1	V2 - 30 RPM

La figure 3.2 montre le plan de carottage des huit anodes crues de 2012 avec les positions des vingt échantillons testés sur chacune d'elles. Les carottes 11, 18, 15, 21, 17 et 25 indiquent les échantillons latéraux de part et d'autre de l'anode dans l'orientation de sa longueur. Les carottes 4, 6, 8 et 10 symbolisent les échantillons du centre. Les coins B, C, D et E en jaune dans la figure 3.2 représentent les positions des accéléromètres placés sur la table de vibration pour les analyses de mesures vibratoires. Les tests réalisés pour les différents échantillons de cette campagne de 2012 sont présentés au tableau 3.4.

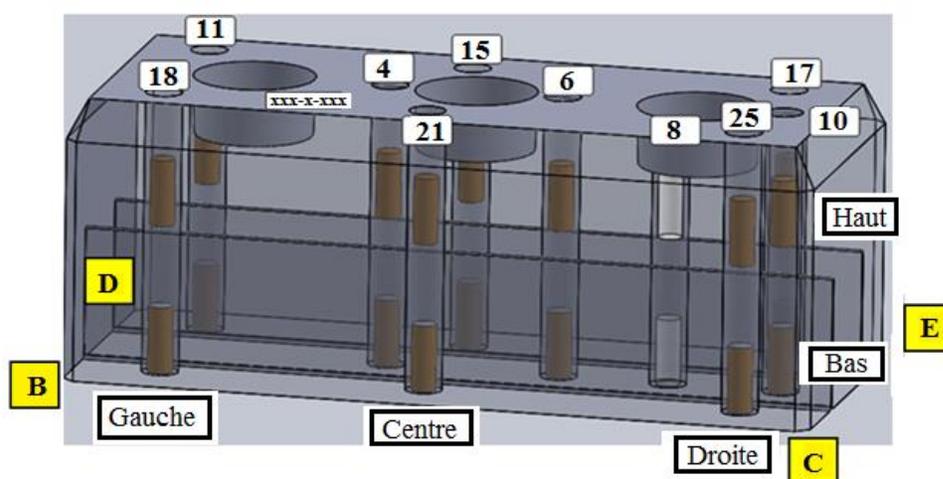


Figure 3.2 : Plan de carottage des huit anodes crues-Campagne 2012.

Tableau 3.4 : Différents tests des échantillons de la campagne 2012.

Échantillons	Densité apparente	Résistivité électrique	Résistance en flexion	Résistance en compression	Module de Young
15, 18 et 25	✓	✓	✓		
11, 17 et 21	✓	✓		✓	✓
4, 6, 8 et 10	✓	✓		✓	✓

3.2.3. Test de flexion à trois points [ISO 12986-1 : 2000]

La résistance en flexion indique la présence de microfissures dans la structure de l'anode. Une faible résistance en flexion indique souvent des problèmes au niveau de la stabilité des grains du coke, des conditions de malaxage et de vibro-compaction [99]. Le test de flexion à trois points consiste à appliquer une charge concentrée sur un échantillon reposant sur deux appuis simples jusqu'à la rupture. La force maximale à la rupture est utilisée pour le calcul de la contrainte de résistance à la flexion. L'équation (3.1) présente la relation utilisée pour le calcul de la contrainte maximale.

$$\sigma_{max} = \frac{8 \cdot F_{max} \cdot L}{\pi \cdot D^3} \quad (3.1)$$

σ_{max} : contrainte de résistance à la flexion [MPa].

F_{max} : charge maximale appliquée [N].

L : longueur entre appuis [mm].

D : diamètre de l'échantillon [mm].

Si la fracture de l'échantillon se produit en dehors de la section située entre les appuis ou en moins de 5 secondes, alors le test est rejeté. La figure 3.3 présente le schéma du test de flexion à trois points. Les échantillons utilisés pour les essais sont cylindriques avec 50 mm de diamètre et 130 mm de longueur. La longueur entre appuis de l'échantillon est de 80 mm. Le taux de chargement est de 1,27 mm/min. Dans le cas de cette étude, les essais sont réalisés à la température ambiante.

La figure 3.4 montre l'équipement utilisé pour le test de flexion à trois points. C'est une machine d'essai universelle MTS Alliance RT100 de capacité maximale de 100 kN. Lors de l'essai, il faut tout le temps vérifier si la fracture de l'échantillon survient au milieu comme prévu.

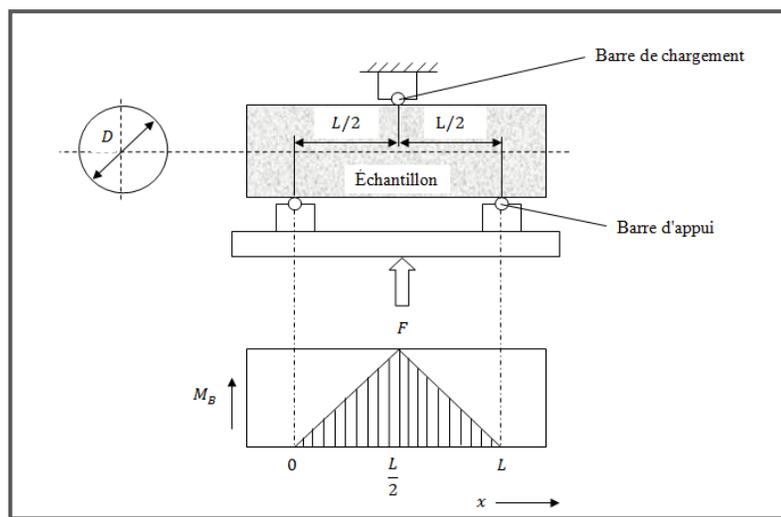


Figure 3.3 : Schéma représentatif du test de flexion à trois points [18].

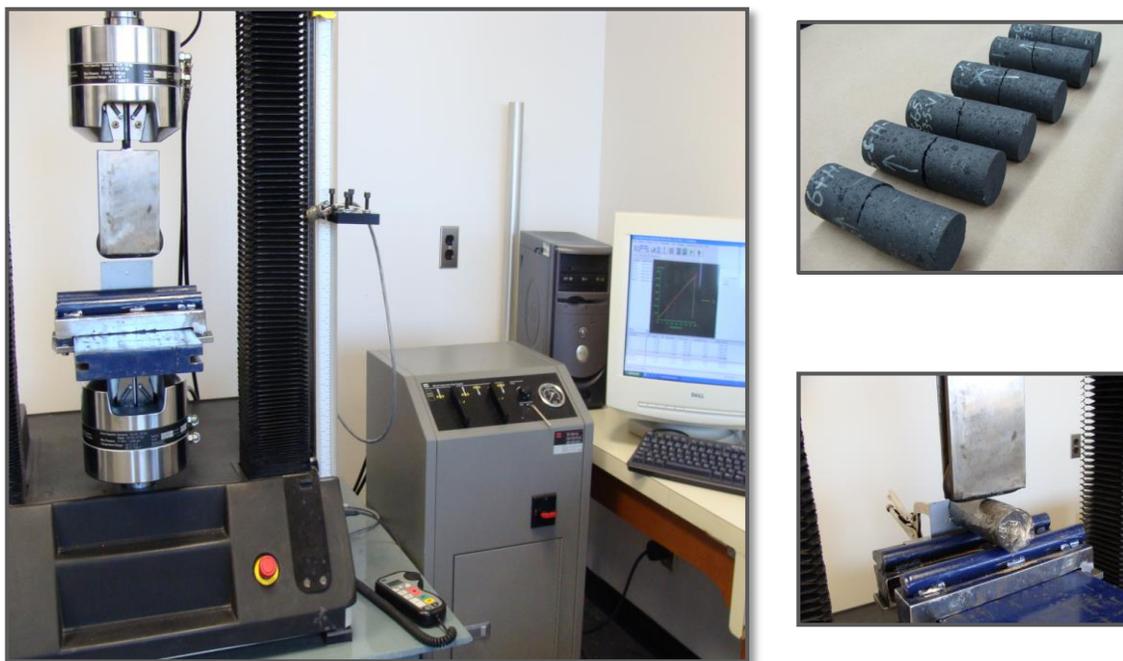


Figure 3.4 : Équipement du test de flexion à trois points.

3.2.4. Test de compression uniaxiale [ASTM C695-91 : 2005 et ISO 18515:2007 (E)]

La résistance d'une anode crue dépend principalement des propriétés mécaniques des matières premières ainsi que des conditions de formation de l'anode [100]. Au niveau des matières premières, ce sont les grandes particules du coke qui fournissent les résistances mécaniques ainsi que le pourcentage et le point de ramollissement du brai. Le carbone peut supporter de grandes charges en mode compression contrairement aux modes de flexion et de traction. Le test de compression uniaxiale permet de mesurer la contrainte maximale de compression, le module de Young ainsi que la courbe contrainte-déformation. La plus grande force appliquée est enregistrée et utilisée pour calculer la résistance à la compression comme indiqué à l'équation (3.2). L'échantillon d'essai doit être droit et cylindrique avec les faces des extrémités parallèles pour des dimensions de 50 mm de

diamètre et de 130 mm de longueur. Dans le cas de cette étude, les essais sont réalisés à la température ambiante.

$$\sigma_{bB} = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

σ_{bB} : résistance à la compression [MPa].

F : charge à la rupture [N].

A : section initiale [mm].

La figure 3.5 illustre un schéma de l'essai de compression uniaxiale. L'équipement utilisé pour l'essai de compression uniaxiale est présenté à la figure 3.6. C'est une presse hydraulique d'essai de fatigue Instron 8801 d'une capacité maximale de 100 kN. Cette presse ne comprend pas d'équipement adapté pour les mesures des tests de compression uniaxiale. Pour ce faire, des plateaux de compression concentriques ainsi qu'un système de jonction servant pour les mesures de déformation par l'extensiomètre avec les dimensions souhaitées ont été conçus au laboratoire. Une cage protectrice qui permet de garder les fragments de l'échantillon à l'intérieur a été aussi conçue. Pour tous les essais réalisés, les échantillons se brisent avec une fragmentation de forme conique ce qui correspond à la norme d'essais en compression uniaxiale.

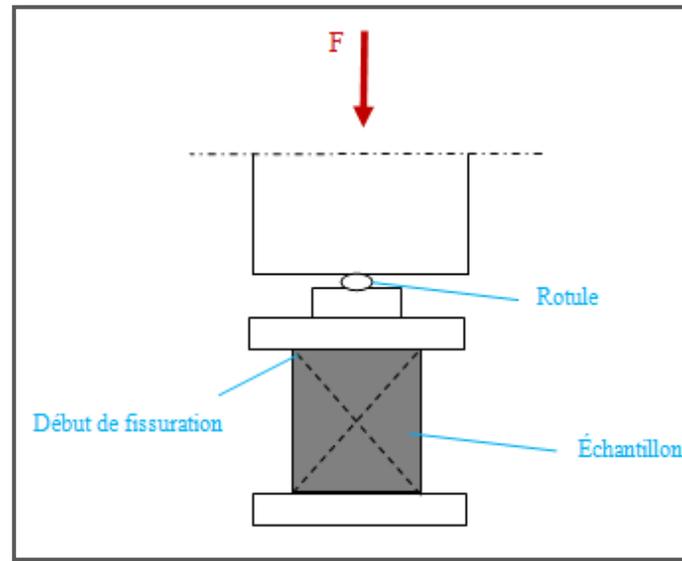


Figure 3.5 : Test de compression uniaxiale.



Figure 3.6 : Équipement du test de compression uniaxiale.

La figure 3.7 montre un exemple de courbe obtenue par le test de compression uniaxiale pour un échantillon donné. Les valeurs numériques du test sont normalisées par rapport à la valeur maximale et présentées sous forme de pourcentage. Le module de Young obtenu de l'essai de compression est calculé par la pente de cette courbe comme c'est indiqué à la figure 3.8 et sa valeur est le paramètre A de l'équation de la droite $y = Ax + B$.

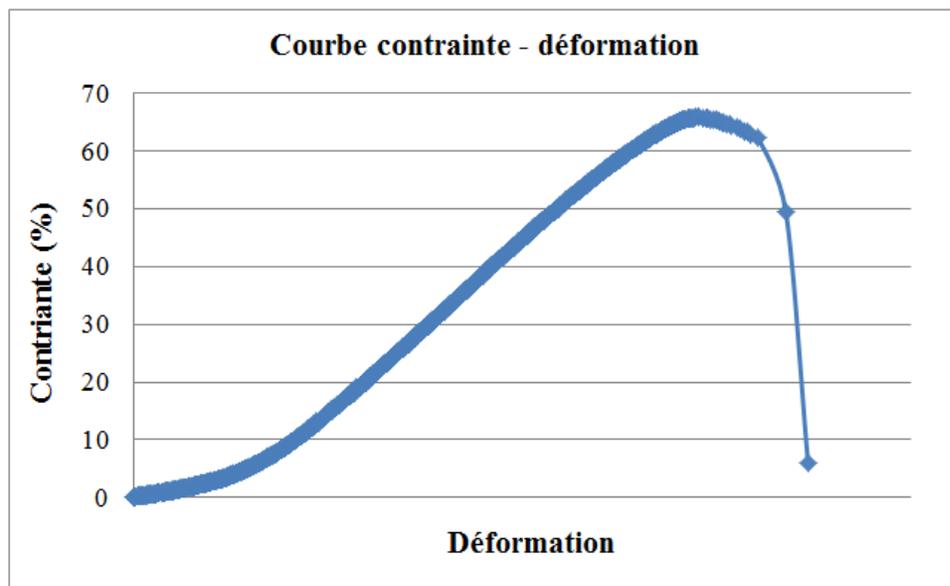


Figure 3.7 : Variation de la résistance en compression en fonction de la déformation.

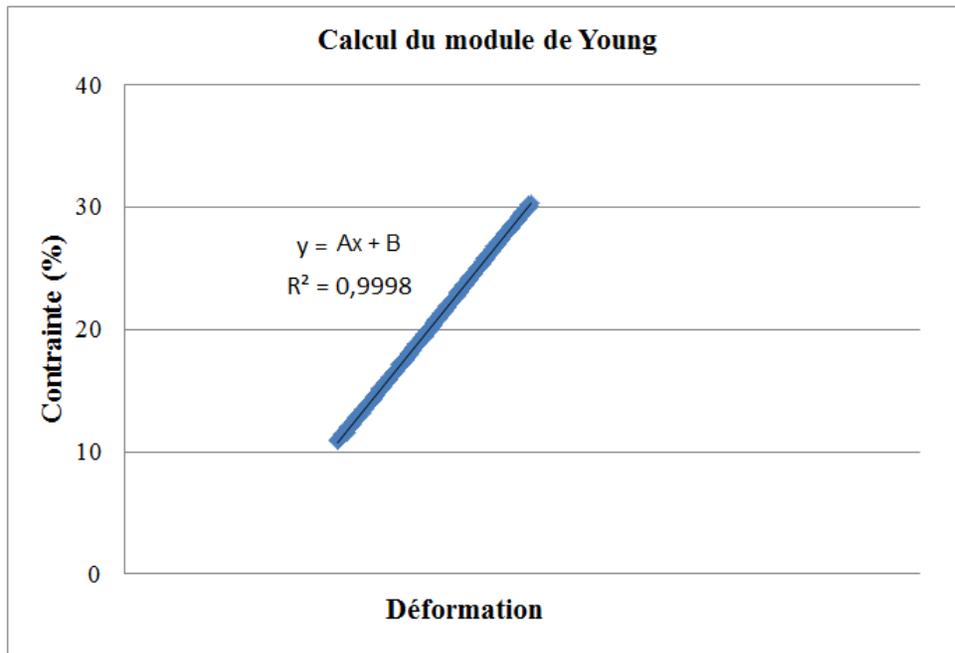


Figure 3.8 : Calcul du module de Young en compression.

3.2.5. Mesure de la densité apparente [ASTM D5502-00]

La densité apparente est une mesure très importante pour la caractérisation des anodes. De hautes densités sont souhaitables tout en ayant des propriétés mécaniques élevées. Comme c'est connu, les propriétés mécaniques sont importantes lors de l'exploitation des anodes par le procédé Hall-Héroult. Donc, il faut trouver un bon compromis entre ces paramètres.

La norme ASTM D5502-00 [29] est utilisée afin de pouvoir mesurer la densité apparente des échantillons d'essai. Au départ, il faut sécher les échantillons vu qu'ils sont carottés à l'eau. Les échantillons d'essai sont circulaires avec un diamètre de 50 mm et une longueur de 130 mm. Il faut mesurer le diamètre selon les axes x et y à quatre positions et faire la moyenne. Pour ce qui est de la longueur, il faut mesurer quatre longueurs et faire la

moyenne. Pour finir, il faut peser l'échantillon. La figure 3.9 montre les procédures de mesure de la densité apparente.

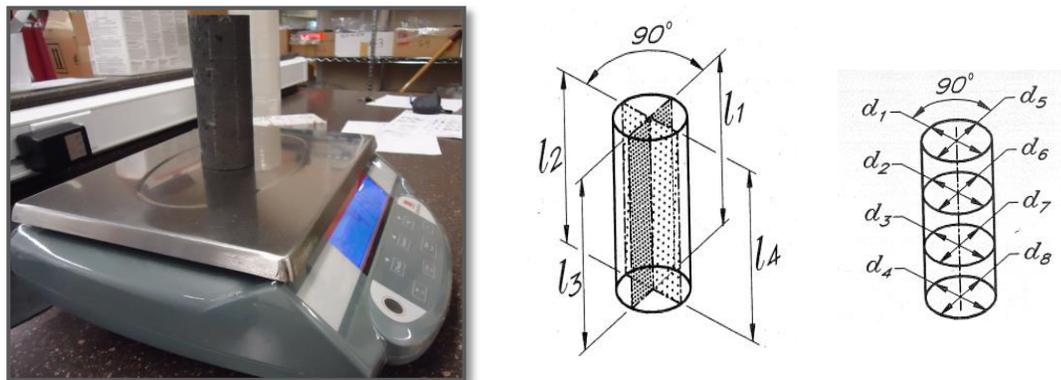


Figure 3.9 : Mesure de la densité apparente [29].

Le calcul de la densité apparente s'effectue comme suit :

$$D = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

avec :

D : densité apparente [g/cm^3].

M : masse de l'échantillon [kg].

V : volume de l'échantillon [cm^3].

$$V = \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) L \quad (3.4)$$

L : longueur moyenne [cm]

d : diamètre moyen [cm].

3.2.6. Mesure de la résistivité électrique [ASTM D6120-97]

La résistivité électrique est une mesure très importante pour la caractérisation de la qualité des anodes. De faibles résistivités électriques sont souhaitables afin de réduire la consommation d'énergie. Des mesures de résistivité électrique sont réalisées sur des anodes crues afin d'avoir un premier aperçu sur la qualité des anodes. Récemment, des études ont été faites afin de déterminer la résistivité électrique d'une anode entière [101, 102]. Dans cette section, les mesures de résistivité électrique d'échantillons standards de 130 mm de long et 50 mm de diamètre sont testées selon la norme ASTM D6120-97 [30]. La résistivité électrique des anodes crues est très élevée par rapport à la résistivité électrique des anodes cuites. Les mesures sont effectuées sur les mêmes échantillons crus utilisés pour la densité apparente. L'équation (3.5) montre la formule utilisée pour le calcul de la résistivité électrique.

$$ER = \frac{V \times A}{I \times L} \quad (3.5)$$

avec :

ER : résistivité électrique [$\mu\Omega\text{m}$].

V : voltage moyen [mV].

A : aire de la section [mm^2].

I : intensité du courant électrique [A].

L : distance entre les points de contact [mm].

Le montage utilisé pour les mesures de résistivité électrique est montré à la figure 3.10. Un courant électrique d'une intensité de 1 ampère traverse l'échantillon. Par la suite, le voltage moyen de l'échantillon est mesuré à l'aide d'un voltmètre pour huit positions autour du diamètre pour une longueur de contact de 100 mm.

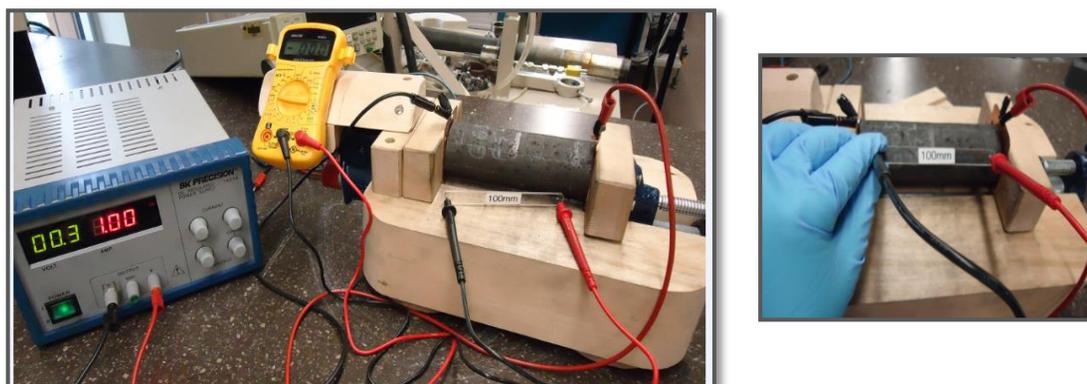


Figure 3.10 : Montage de mesure de la résistivité électrique.

3.2.7. Mesures vibratoires : Vibro-compacteurs industriels

Durant la campagne de 2012, le partenaire industriel a effectué des mesures vibratoires sur les vibro-compacteurs industriels durant le régime permanent qui par la suite ont été analysés. Ces mesures ont été réalisées au moment de la formation des trente-deux anodes industrielles. Les procédures de mesures consistent à placer quatre accéléromètres sur les quatre coins de la table de vibration à des distances égales et deux accéléromètres sur la tige. La figure 3.11 présente la disposition des accéléromètres par rapport à l'anode. Quatre accéléromètres sont placés autour de la table de vibration (accéléromètre B, C, D et E) et un accéléromètre au niveau de la tige guide (accéléromètre A). Les mesures d'accélération ont été prises en même temps pour la tige guide ainsi que la

table de vibration. Ces mesures permettent d'avoir les vitesses, les accélérations, les forces de vibration ainsi que l'état des vibro-compacteurs.

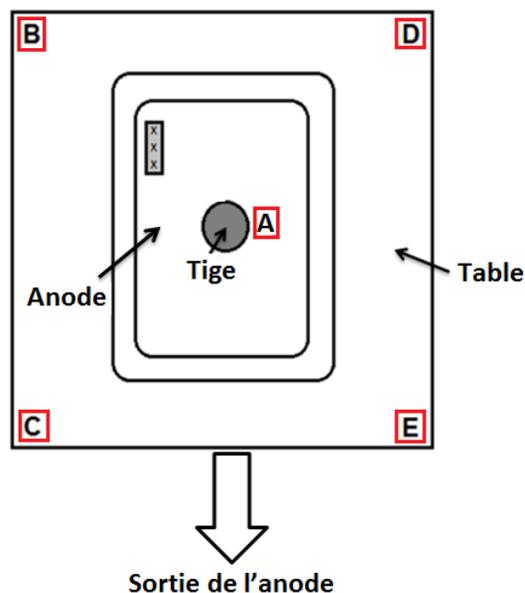


Figure 3.11 : Position des accéléromètres des mesures vibratoires industrielles.

3.3. Résultats et discussions

Les résultats de cette thèse ont été normalisés ou présentés de façon adimensionnelle à cause de la confidentialité, sans perdre le contexte scientifique et la valeur des résultats. Cette section présente le détail des résultats des tests de flexion à trois points, de compression uniaxiale, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité électrique des anodes provenant des campagnes de 2011 et 2012. Elle montre aussi les résultats des analyses des mesures vibratoires de la campagne de 2012. Tous les résultats présentés durant ce chapitre sont normalisés par rapport à la valeur maximale obtenue durant les différents tests et exposés sous forme de pourcentage. Les valeurs maximales

prises durant la normalisation sont les mêmes pour les anodes des deux campagnes 2011 et 2012.

3.3.1. Variation des propriétés selon les trois axes-Campagne 2011

Dans cette section, les résultats obtenus des caractérisations physiques et mécaniques des quatre anodes de 2011 selon les trois axes sont présentés.

- **Résistance en flexion**

Le tableau 3.5 montre les résistances en flexion normalisées des anodes crues provenant des vibro-compacteurs A, B, C et D. Pour les vibro-compacteurs A et B, la résistance en flexion des échantillons pris selon la direction Z-Z est plus faible comparée aux autres axes de ces anodes. Rappelant que l'axe Z-Z représente les échantillons qui sont situés à la verticale dans l'anode. Les résistances en flexion des échantillons du vibro-compacteur C ont en moyenne des résistances presque équivalentes selon les trois axes. L'anode provenant du vibro-compacteur D est bien plus résistante selon l'axe Y-Y comparé aux autres axes. Les résistances en flexion sont très importantes à cause des différences de contraintes qui se génèrent entre la partie de l'anode immergée et non immergée dans le bain électrolytique. Généralement, un certain degré de résistance en flexion est souhaitable afin de pouvoir résister aux contraintes mécaniques dues au transport, au scellement et autres. Cependant, des résistances en flexion élevées conduiront à un comportement fragile de l'anode qui peut engendrer des problèmes de choc thermique [18]. Du côté des résistances des échantillons situés juste au-dessous du trou de formage, l'anode du vibro-

compacteur A présente de faibles résistances en flexion comparée à toutes les autres anodes.

Tableau 3.5 : Variation de la résistance à la flexion selon les trois axes.

Résistance à la flexion (%)					
	Calculs	Y-Y	Z-Z	X-X	Bas-Trou
Vibro-A	Moyenne	82,57	65,15	83,55	66,12
	Écart type	9,57	12,57	10,32	
Vibro-B	Moyenne	74,87	69,56	77,32	72,61
	Écart type	5,27	9,25	4,50	
Vibro-C	Moyenne	77,94	76,22	75,32	74,57
	Écart type	4,04	8,08	8,45	
Vibro-D	Moyenne	84,74	76,51	73,60	74,97
	Écart type	7,85	9,05	8,08	

- **Résistance en compression**

Les résultats des résistances en compression normalisés de ces quatre anodes sont présentés au tableau 3.6. L'anode du vibro-compacteur A indique de faibles résistances en compression pour l'axe Z-Z comparé aux autres axes. L'anode du vibro-compacteur B est plus résistante selon l'axe X-X. Pour ce qui est des anodes des vibro-compacteurs C et D, elles ont plus de résistances selon l'axe Y-Y. Donc, durant le transport, la manipulation ou l'empilement de ces anodes, il faut prendre en considération ces différentes propriétés obtenues selon les trois axes. Pour exemple, lors de la cuisson des anodes crues, c'est l'axe X-X qui travaille le plus comparé aux autres axes, car les anodes sont disposées selon leurs longueurs dans le four sur trois rangées. Les anodes se situant à la première rangée du bas

vont subir toute la charge des deux rangées d'anodes qui sont situées en haut. L'axe Z-Z est important lors que l'empilement des anodes (zone entreposage).

Pour ce qui est des limites des résistances en compression, comme pour le cas de la résistance en flexion, un certain niveau de résistance est souhaitable; cependant, des résistances mécaniques élevées conduiront à des problèmes de chocs thermiques [18]. Donc, pour vraiment savoir les limites des propriétés mécaniques, il va falloir faire des tests de résistances au choc thermique des anodes après leurs cuissons.

L'analyse des résultats des échantillons situés en bas des trous de formage des quatre anodes a montré des résistances en compression plus élevées. Ce phénomène est logique, car la hauteur de l'anode qui est vibro-compactée à ce niveau est plus faible, donc ce qui conduit à de plus grandes résistances en compression. Ce résultat est aussi influencé par le niveau de confinement occasionné par le procédé de formage du tourillon. Pour ce qui est des échantillons situés entre les trous de formage, leurs résistances sont variables. Un des éléments majeurs créant cette variation est la manière dont la pâte est distribuée lorsqu'elle est versée dans le moule.

Tableau 3.6 : Variation de la résistance à la compression selon les trois axes.

Résistance à la compression (%)						
	Calculs	Y-Y	Z-Z	X-X	Bas-Trou	Entre-Trous
Vibro-A	Moyenne	67,72	55,62	65,35	70,78	70,53
	Écart type	8,86	9,35	6,12		1,61
Vibro-B	Moyenne	58,73	58,85	62,99	71,29	58,03
	Écart type	10,80	7,03	9,83		19,24
Vibro-C	Moyenne	66,37	62,89	63,41	66,57	53,91
	Écart type	7,92	9,07	3,51		4,04
Vibro-D	Moyenne	61,20	58,65	57,27	75,08	59,52
	Écart type	5,24	8,66	11,58		4,49

Les rapports obtenus entre les contraintes maximales des tests de flexion et de compression présentés au tableau 3.7 varient entre 3 et 4. Donc, la résistance à la compression des anodes est trois à quatre fois plus élevée que la résistance en flexion. Si ce rapport devient plus grand, cela indique l'existence de macro fissures dans le cas des anodes cuites [18]. Ce rapport peut être amené à l'aide d'un critère de rupture de Mohr-Coulomb par exemple.

Tableau 3.7 : Rapport entre les résistances de compression et de flexion.

Rapport compression/flexion				
	Vibro-A	Vibro-B	Vibro-C	Vibro-D
X-X	4,04	3,86	4,19	3,55
Z-Z	4,20	4,16	4,06	3,77
Y-Y	3,85	4,01	4,14	3,83

- **Module de Young**

Le tableau 3.8 montre les résultats normalisés des mesures du module de Young durant le test de compression uniaxiale. Les vibro-compacteurs A, B et C indiquent un module de Young plus élevé pour l'axe Y-Y comparé aux autres axes. Les modules de Young du vibro-compacteur D sont les mêmes pour tous les axes. Un module de Young élevé (pente élevée) signifie que le matériau testé présente une inélasticité élevée. Un module de Young plus faible va permettre une plus grande déformation pour une même valeur de la force appliquée. Comme pour les résistances en flexion et en compression, un faible module de Young est souhaitable afin de prévenir un comportement qui peut conduire aux problèmes de chocs thermiques [18].

Tableau 3.8 : Variation du module de Young selon les trois axes.

Module de Young (%)						
	Calculs	Y-Y	Z-Z	X-X	Bas-Trou	Entre-Trous
Vibro-A	Moyenne	53,36	45,15	45,73	47,79	51,60
	Écart type	4,40	4,40	10,26		5,80
Vibro-B	Moyenne	53,65	47,20	50,94	55,70	42,51
	Écart type	5,17	5,43	4,40		10,42
Vibro-C	Moyenne	71,83	47,79	49,84		42,61
	Écart type	48,08	3,52	3,52		5,15
Vibro-D	Moyenne	55,97	56,11	57,75	50,13	43,68
	Écart type	11,14	20,23	21,11		2,49

La figure 3.12 présente l'influence de la variation du module de Young en fonction de la résistance en compression. L'analyse montre que lorsque la résistance en compression augmente, le module de Young augmente aussi.

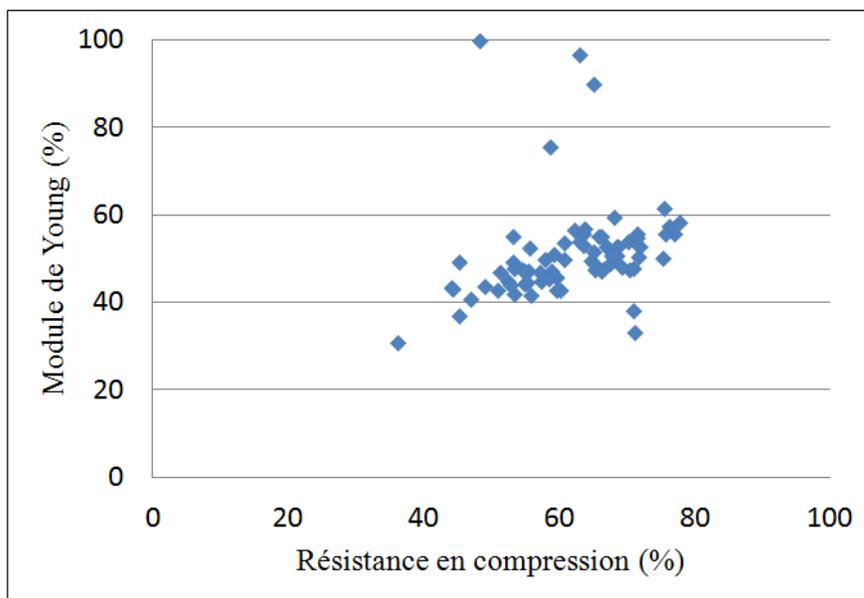


Figure 3.12 : Variation du module de Young en fonction de la résistance en compression.

- **Densité apparente**

La variation de la densité apparente selon les trois axes est montrée au tableau 3.9. Les résultats des densités apparentes obtenues sont similaires pour tous les axes de mesure. Pour ce qui est des échantillons situés en bas des trous de formage, ils ont des densités plus élevées. C'est dû au même principe qu'on a expliqué pour les résistances en compression.

Tableau 3.9 : Variation de la densité apparente selon les trois axes.

Densité apparente (%)						
	Calculs	Y-Y	Z-Z	X-X	Bas-Trou	Entre-Trous
Vibro-A	Moyenne	93,78	93,12	92,88	95,06	94,49
	Écart type	0,65	1,22	1,45		
Vibro-B	Moyenne	92,80	92,68	93,21	95,10	92,03
	Écart type	1,14	0,68	0,99		2,52
Vibro-C	Moyenne	94,34	93,93	93,94	94,78	92,60
	Écart type	0,51	0,57	0,51	0,40	0,87
Vibro-D	Moyenne	93,93	93,36	92,79	94,78	92,22
	Écart type	0,57	1,14	1,71	0,40	0,57

- **Résistivité électrique**

Les résistivités électriques obtenues pour les quatre anodes de la campagne de 2011 sont montrées au tableau 3.10. De faibles résistivités électriques sont souhaitables. Dans les cas des vibro-compacteur A et B, les axes Z-Z et Y-Y respectivement indiquent des résistivités électriques élevées. Cependant, le vibro-compacteur B montre des résistivités électriques élevées comparées à tous les autres vibro-compacteurs. L'axe Y-Y présente des résistivités électriques faibles comparées aux autres axes pour ce qui est du vibro-compacteur C. Du côté du vibro-compacteur D, les résistivités électriques sont similaires pour tous les axes.

La résistivité électrique des anodes crues est très élevée comparée à celle des anodes cuites et cela est dû soit au brai qui n'est pas encore cokéfié ou à la présence de fissures.

Une petite quantité de brai peut augmenter de beaucoup la résistivité électrique. Donc la variation de la résistivité électrique peut être due à la distribution du brai dans l'anode.

Tableau 3.10 : Variation de la résistivité électrique selon les trois axes.

Résistivité électrique (%)						
	Calculs	Y-Y	Z-Z	X-X	Bas-Trou	Entre-Trous
Vibro-A	Moyenne	9,42	15,94	12,09	9,99	8,27
	Écart type	0,88	3,46	3,91	0,31	1,56
Vibro-B	Moyenne	27,50	24,24	20,35	10,14	19,25
	Écart type	8,45	15,38	7,44		9,93
Vibro-C	Moyenne	8,64	10,32	10,21	9,08	11,86
	Écart type	1,00	2,90	3,26	0,67	4,72
Vibro-D	Moyenne	6,55	7,01	7,16	7,71	8,31
	Écart type	0,71	1,07	1,15	0,37	0,62

- **Analyse en composantes principales**

Afin de mieux analyser les résultats de la campagne de 2011, la méthode de l'analyse en composantes principales (principal components analysis en anglais) est utilisée. C'est une méthode de la statique multivariée qui consiste à transformer des variables liées entre elles en nouvelles variables dé-corrélées les unes des autres. Les nouvelles variables sont nommées composantes principales. En tout, cette méthode permet de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante. C'est une technique qui explique au mieux la variabilité des données.

Cette méthode prend en considération la covariance entre les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie. Elle est principalement basée sur les valeurs de p statistique de la matrice de corrélation. La matrice de corrélation est calculée selon la formule suivante :

$$(3.6)$$

$$\rho(A, B) = \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \sigma_B}$$

σ_A : déviation standard des paramètres d'entrée.

σ_B : déviation standard des paramètres de sortie.

ρ : coefficient de corrélation.

C'est la covariance des paramètres d'entrée avec ceux de sortie divisée par la déviation standard du produit des données d'entrée avec celles de sortie. Ces coefficients de corrélation ont permis d'évaluer l'influence des données d'entrée sur les données de sortie en utilisant les valeurs de probabilité. Une valeur de probabilité p qui est petite indique que les paramètres d'entrée ont une influence significative sur les paramètres de sortie. La procédure généralement employée consiste à comparer cette valeur de p à un seuil préalablement défini (traditionnellement 5 % ou <0,05). Le seuil de 5 % provient du fait que l'intervalle de confiance pris durant les analyses est de 95 %. Pour tout paramètre d'entrée si la valeur de p est inférieure à 0,05 ce paramètre a été sélectionné. Dans certains cas cette valeur de p dépend du nombre d'essais, tend qu'il y'a plus de données tend que c'est plus significatif.

Le tableau 3.11 montre les valeurs de p de la matrice de corrélation obtenues pour les différents cas d'analyse. Les variables indépendantes d'entrée prises en considération sont : les vibro-compacteurs, position en haut (H) et en bas (B) des échantillons, les trois axes, les répartitions gauches, centres et droites des échantillons de la figure 3.1. Le classement de ces valeurs de p selon leurs fortes dépendances pour les paramètres étudiés est présenté au tableau 3.12.

Tableau 3.11 : Valeurs de p-Campagne 2011.

Paramètres	Densité	Résistivité	Flexion	Compression	Young
Vibros	0,24	1×10^{-7}	0,43	0,31	0,03
Position H-B	2×10^{-3}	0,02	0,79	0,04	0,80
Axes X-Y-X	0,84	0,45	0,02	0,30	0,43
Répartition G-C-D	3×10^{-4}	0,09	0,68	0,02	0,10

Comme exemple, pour le cas de la densité, c'est la répartition des échantillons qui présente la plus forte dépendance. Donc, cela signifie que la densité est très sensible à la répartition des échantillons. Par la suite, en deuxième place viennent les positions des échantillons en haut ou en bas de l'anode. La densité n'est pas influencée par les variations d'axes et de vibro-compacteurs.

Tableau 3.12 : Classement des paramètres ayant une forte dépendance-Campagne 2011.

Paramètres	Densité	Résistivité	Flexion	Compression	Young
Vibros		1			1
Position H-B	2	2		2	
Axes X-Y-X			1		
Répartition G-C-D	1			1	

Pour conclure, la densité apparente et la résistance en compression changent en fonction de la variation des répartitions des échantillons d'essais. La variation des positions (Haut-Bas) fait varier la densité apparente, la résistivité électrique et la résistance en compression. La résistivité électrique de même que le module de Young sont influencés par la variation des vibro-compacteurs. Quant à la résistance en flexion, elle est seulement influencée par le changement des axes.

3.3.2. Comparaison selon les positions haut et bas de l'anode-Campagne 2012

Les anodes en carbone sont composées de matériaux hétérogènes qui peuvent avoir des comportements variables d'une anode à une autre et dans une anode elle-même. Vu qu'il y'a beaucoup de paramètres d'entrée, il est devenu nécessaire de réduire le nombre de variables. Cependant, ce n'est pas possible de le faire d'une manière arbitraire. Donc, afin de pouvoir mieux voir certaines tendances dans les propriétés et de pouvoir mieux interpréter les résultats, les méthodes d'analyses statistiques telles que ANOVA factoriel et l'analyse en composantes principales ont été utilisées. Les comparaisons des résultats normalisés pour les propriétés physiques et mécaniques des huit anodes crues de la campagne de 2012 selon les positions en haut et en bas de l'anode sont présentées dans cette section.

ANOVA factorielles est une méthode d'analyse statistique ayant pour objectif de tester la présence de différences significatives entre les moyennes. Les résultats des essais sont analysés en utilisant le logiciel d'analyse statistique Statistica®. Pour que l'analyse utilisant ANOVA soit représentative, les données de chaque population doivent suivre une distribution normale tel que présenté à la figure 3.13 pour le cas des résultats de la résistance en flexion. Effectivement, les données sont linéairement distribuées autour de la droite de Henry (ligne droite rouge) [103].

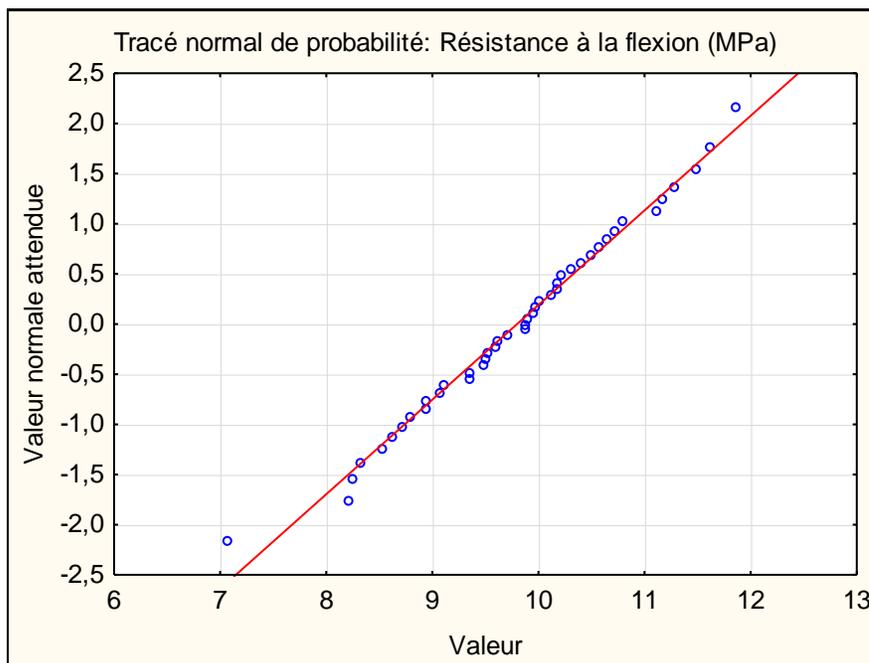


Figure 3.13 : Distribution normale des données de la résistance en flexion.

Les valeurs de p obtenus pour les différentes propriétés analysées dans le cas des positions du haut et du bas des échantillons en fonction des quatre vibro-compacteurs sont présentées au tableau 3.13 pour un intervalle de confiance de 95 %. Si la valeur p est inférieure à 0,05, donc il faut déclarer que l'hypothèse est statistiquement significative. Dans le cas contraire, si la valeur de p est supérieure à ce seuil, statistiquement il n'existe pas de différence entre les paramètres étudiés. Cependant, une analyse de la variation des moyennes et des tendances peut être faite à ce niveau afin de pouvoir interpréter les résultats.

Les résultats obtenus des résistances en flexion et en compression, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité électrique pour les positions du haut et du bas sont respectivement présentés aux figures suivantes : figure 3.14, figure 3.15, figure

3.16, figure 3.17 et figure 3.18. En général, les caractéristiques physiques et mécaniques des anodes de la campagne de 2012 présentent de faibles propriétés pour les échantillons qui sont situés en bas de l'anode comparées à ceux en haut (niveau rainure) que ce soit les résistances en flexion et en compression, le module de Young ou la densité apparente. Pour la résistivité électrique, c'est l'inverse, les échantillons du bas ont des résistivités électriques plus élevées comparées à ceux du haut. La résistivité électrique diminue normalement lorsque la densité augmente ce qui est le cas dans le cas de cette étude.

Tableau 3.13 : Valeurs de p pour les propriétés des échantillons hauts et bas-Anodes 2012.

Positions haut et bas-2012	Valeur de p	Intervalle de confiance
Résistance à la flexion	0,29608	0,95
Résistance à la compression	0,04562	0,95
Module de Young	0,09824	0,95
Densité apparente	0,03071	0,95
Résistivité électrique	0,00000	0,95

Les valeurs de p pour les résistances en compression, la densité et la résistivité électrique sont inférieures à 5 %, par conséquent statistiquement il existe une différence entre ces propriétés pour les positions du haut et du bas de l'anode. Statistiquement la résistance en flexion et le module de Young ne sont pas affectés par ce changement de position vu que les valeurs de p ne sont pas inférieures à 5 %. Dans le cas des vibro-compacteurs A et B, les différences entre les propriétés des échantillons situés en haut et en bas de l'anode sont moins prononcées comparés aux vibro-compacteurs C et D.

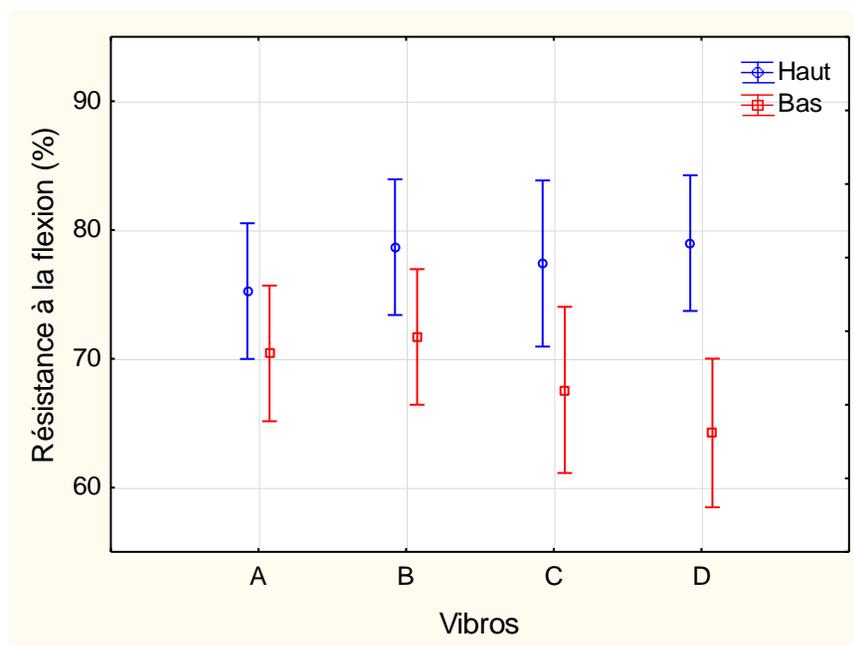


Figure 3.14 : Variation de la résistance à la flexion selon les positions-Anodes 2012.

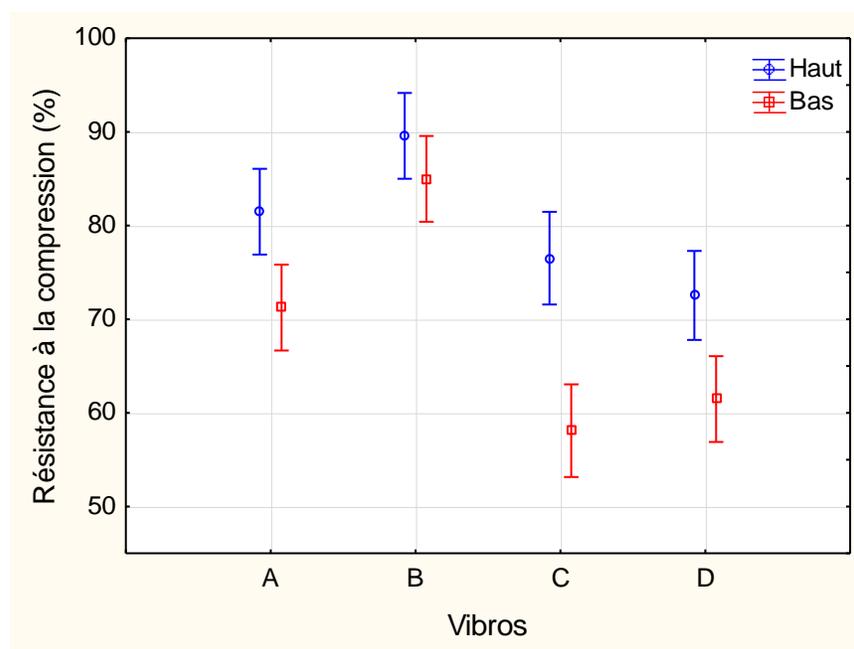


Figure 3.15 : Variation de la résistance en compression selon les positions-Anodes 2012.

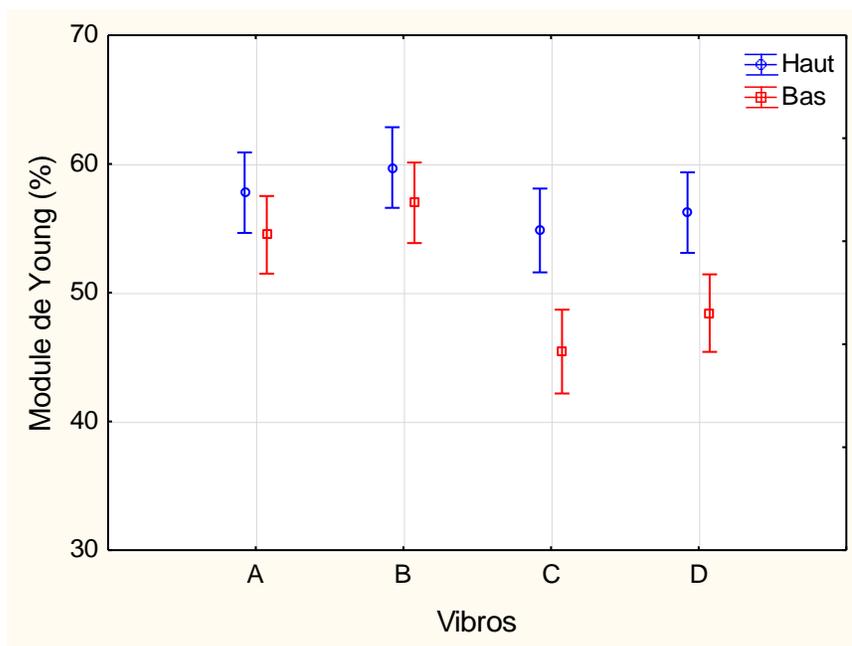


Figure 3.16 : Variation du module de Young selon les positions-Anodes 2012.

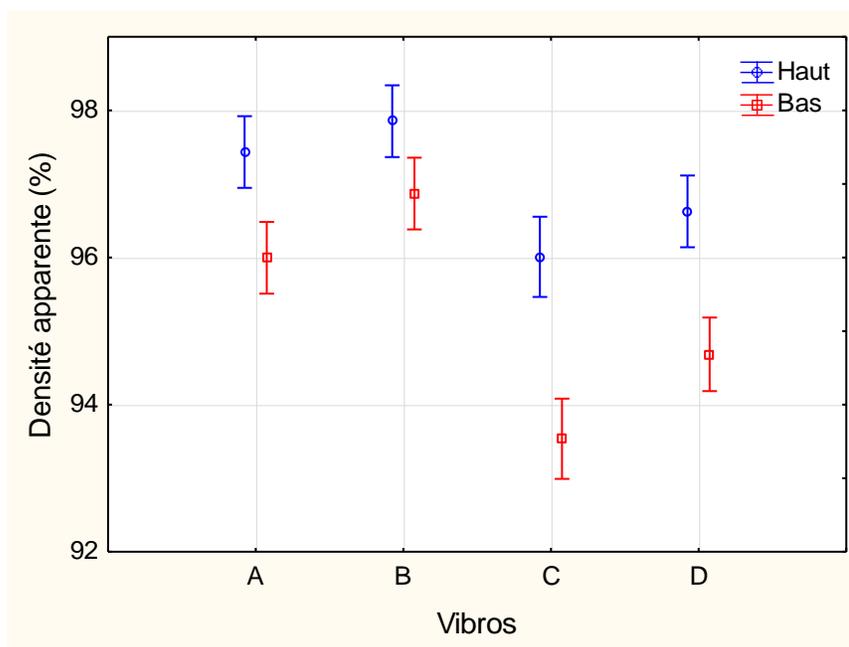


Figure 3.17 : Variation de la densité apparente selon les positions-Anodes 2012.

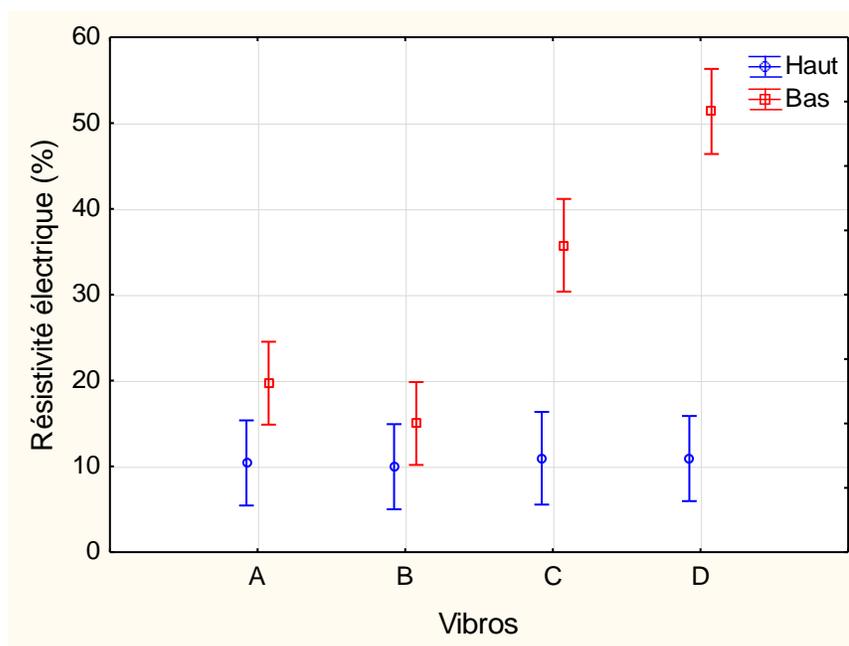


Figure 3.18 : Variation de résistivité électrique selon les positions-Anodes 2012.

Le tableau 3.14 illustre les moyennes et les écarts types des différentes propriétés obtenues des huit anodes crues durant la campagne de 2012 selon les positions du haut et du bas de l'anode.

Tableau 3.14 : Variation des propriétés selon les positions du haut et du bas.

Propriétés	Calculs	Vibro-A		Vibro-B		Vibro-C		Vibro-D	
		Haut	Bas	Haut	Bas	Haut	Bas	Haut	Bas
Résistance en flexion (%)	Moyenne	75,26	70,42	78,66	71,69	77,40	67,58	75,67	64,24
	Écart type	2,68	5,62	6,91	5,54	5,53	7,81	8,98	7,93
Résistance en compression (%)	Moyenne	81,48	71,24	89,58	84,98	76,51	58,10	72,54	61,47
	Écart type	10,10	6,93	7,44	9,16	7,35	5,50	10,26	10,52
Module de Young (%)	Moyenne	57,77	54,50	59,72	56,98	54,83	45,43	56,22	48,41
	Écart type	5,98	5,69	2,11	2,43	5,41	2,99	8,58	7,95
Densité apparente (%)	Moyenne	97,43	96,00	97,85	96,87	96,01	93,54	96,63	94,68
	Écart type	1,17	1,34	0,46	0,97	1,09	1,95	0,62	0,75
Résistivité électrique (%)	Moyenne	10,40	19,69	9,96	15,00	10,94	35,76	10,91	51,35
	Écart type	3,74	9,27	0,77	10,16	2,54	11,23	0,85	24,56

En analysant les moyennes obtenues pour les variations des résistances en flexion pour les quatre vibro-compacteurs, une observation peut être faite : le vibro-compacteur B possède des résistances en flexion relativement élevées comparée aux autres vibro-compacteurs. La pression de charge du vibro-compacteur B (P1) est supérieure comparée aux autres vibro-compacteurs (voir tableau 3.2) et plus spécifiquement comparé au vibro-compacteur D pour lequel ce sont les mêmes matières premières qui sont utilisées. Donc, une pression de charge élevée engendre des résistances mécaniques élevées. Cependant, un certain niveau de pression élevé conduit à la formation des fissures [104] après cuisson qui sont causées par des résistances mécaniques élevées. La pression de charge ne sert pas seulement à augmenter la densité, mais aussi elle joue un rôle très important au niveau de la synchronisation de la vibration de la table avec la tige guide. Une pression de charge élevée rend le travail de vibro-compacteur similaire à celui d'une presse, ce qui n'est pas souhaitable. Il faut que les ballons de charge aient une certaine flexibilité afin de pouvoir faire leur travail.

Il faut aussi noter que le vibro-compacteur D présente l'écart le plus élevé entre les résistances en flexion des parties du haut et du bas de l'anode. Selon l'historique, ce vibro-compacteur a produit beaucoup d'anodes avec des fissurations horizontales. Ce qui est logique vu l'écart entre les propriétés.

Maintenant, pour ce qui est des moyennes de la résistance en compression, du module de Young et de la densité apparente, c'est toujours le vibro-compacteur B qui a les propriétés les plus élevées avec l'écart le plus faible entre les propriétés des parties haut et

du bas. Ce fait est dû à la pression de charge élevée utilisée pour ce cas d'étude (P1). Donc, afin d'améliorer les propriétés entre les parties du haut et bas de l'anode, il va falloir travailler sur l'ajustement des ballons de charge afin de trouver les plages d'opérations adéquates donnant de meilleurs résultats sans avoir à créer des problèmes de fissuration des anodes.

Du côté de la résistivité électrique, l'écart le plus élevé entre les résistivités du haut et du bas a été obtenu au niveau du vibro-compacteur D pour lequel la pression de charge était la plus faible (P4).

3.3.3. Comparaison selon les temps de vibration T1 et T2-Campagne 2012

Les comparaisons des résultats des propriétés physiques et mécaniques normalisés pour les huit anodes crues de la campagne de 2012 en fonction des temps de vibration T1 et T2 sont présentées dans cette section. Comme rappel, le temps T1 correspond au temps T2 moins sept secondes. Comme pour la section précédente 3.3.2, c'est l'approche ANOVA de Statistica® qui est utilisée pour le traitement des résultats. Les valeurs de p obtenus pour les différentes propriétés analysées dans le cas des temps de vibration T1 et T2 en fonction des quatre vibro-compacteurs sont présentées au tableau 3.15 pour un intervalle de confiance de 95 %. Comme dans la section 3.3.2, ce sont les résultats des caractérisations physiques et mécaniques des échantillons des huit anodes crues présentés au tableau 3.4 qui sont analysés dans cette section. Les résultats obtenus des résistances en flexion et en compression, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité

électrique pour les temps de vibration T1 et T2 sont montrés respectivement aux figures suivantes : figure 3.19, figure 3.20, figure 3.21, figure 3.22 et figure 3.23.

Statistiquement dans ce cas d'analyse pour les huit anodes crues testées, il n'y a pas de différence entre les propriétés physiques et mécaniques pour les temps de vibration T1 et T2 puisque les valeurs de p ne sont pas inférieures à 0,05. Cependant, il y'a toujours des fissures après la cuisson (à T1 et T2), mais il y'en a plus à T2 [104]. La présence de fissures après cuisson peut être due à une sur-compaction créant ainsi des tensions entre les particules qui conduisent à la formation de fissures due aux contraintes mécaniques générées durant le procédé de vibro-compaction.

Tableau 3.15 : Valeurs de p pour la variation du temps de vibration.

Temps T1 et T2-2012	Valeur de p	Intervalle de confiance
Résistance à la flexion	0,54919	0,95
Résistance à la compression	0,12747	0,95
Module de Young	0,12174	0,95
Densité apparente	0,24014	0,95
Résistivité électrique	0,45098	0,95

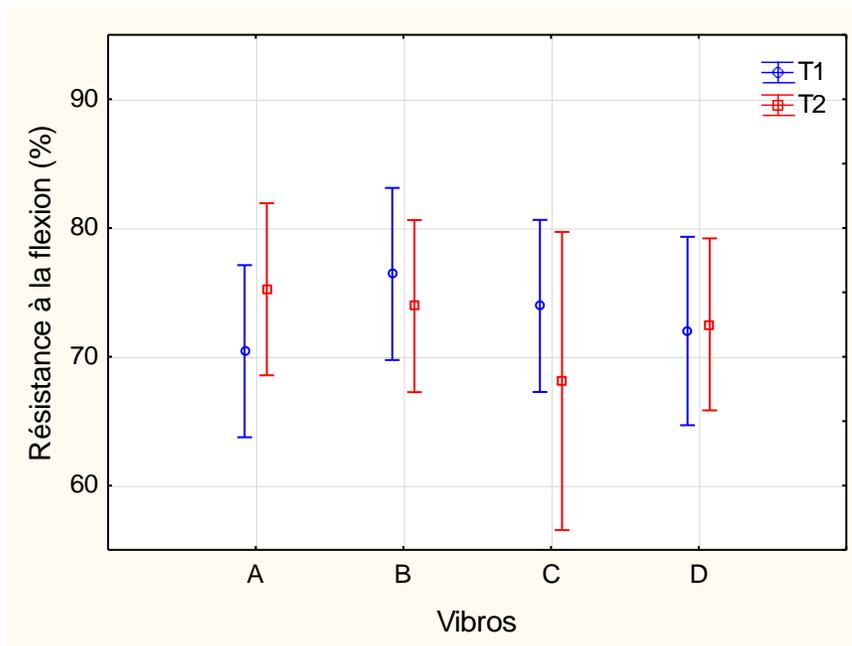


Figure 3.19 : Variation de la résistance en flexion selon le temps de vibration-Anodes 2012.

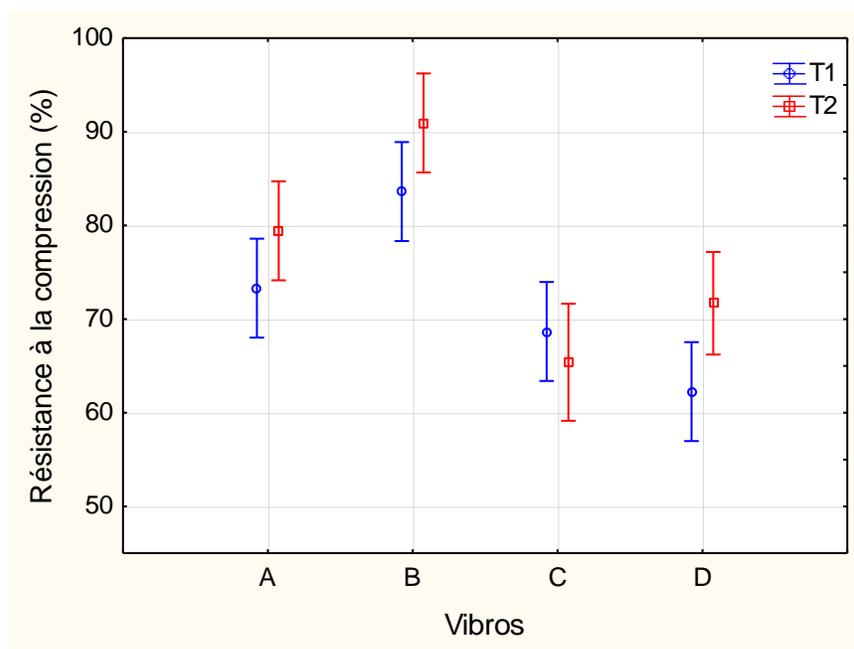


Figure 3.20 : Variation de la résistance en compression selon le temps de vibration-Anodes 2012.

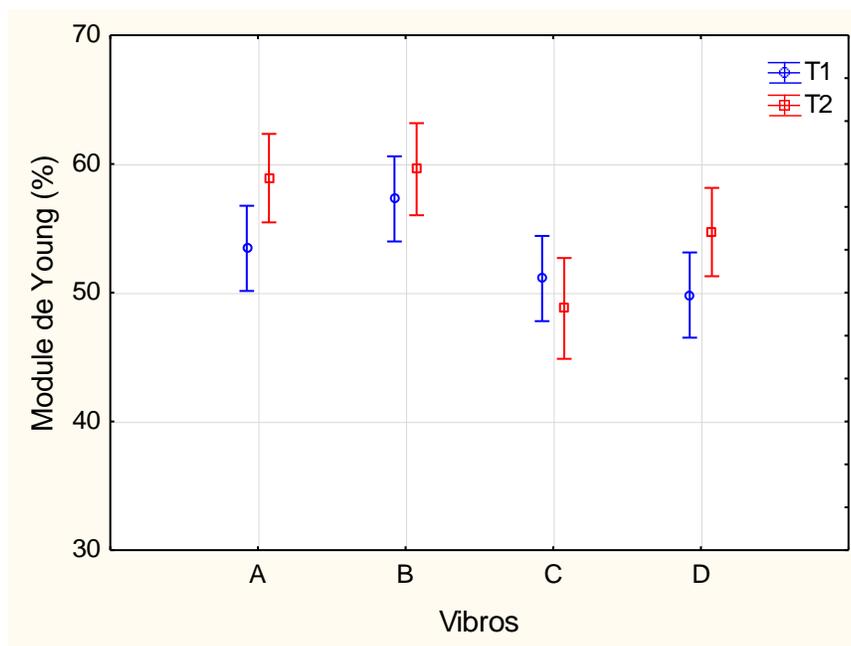


Figure 3.21 : Variation du module de Young selon le temps de vibration-Anodes

2012.

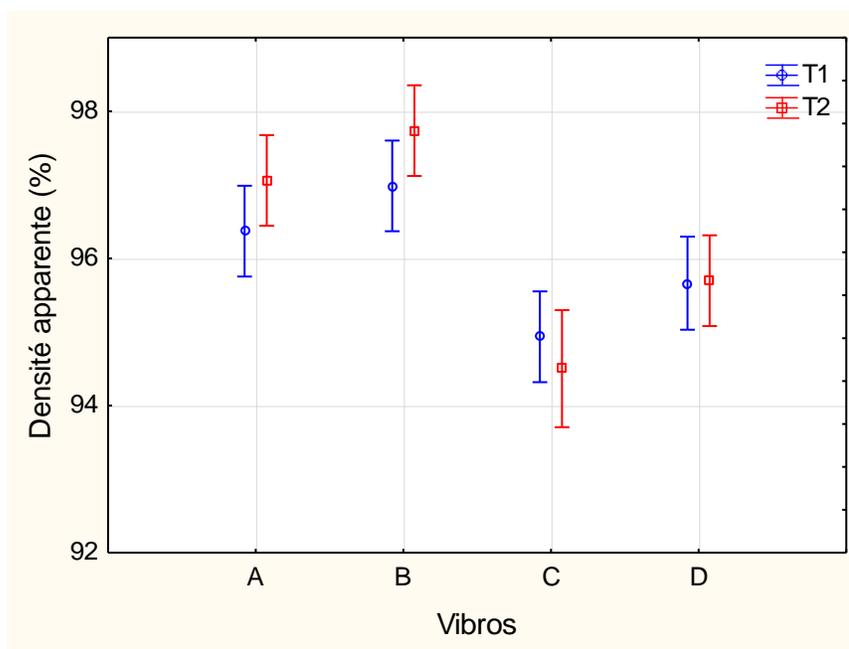


Figure 3.22 : Variation de la densité apparente selon le temps de vibration-Anodes 2012.

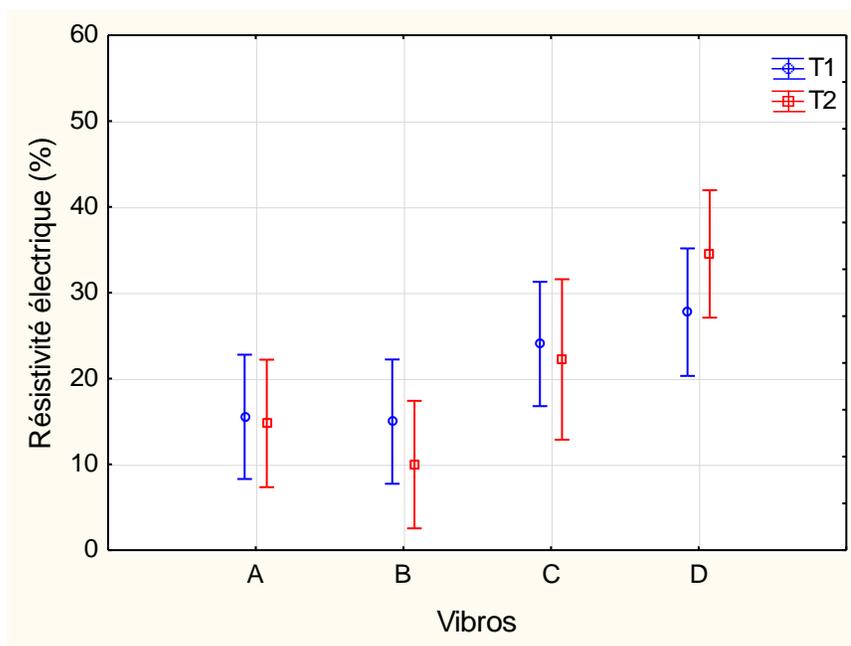


Figure 3.23 : Variation de la résistivité électrique selon le temps de vibration-Anodes 2012.

Le tableau 3.16 illustre les moyennes et les écarts types des différentes propriétés obtenues des huit anodes crues durant la campagne de 2012 pour les temps de vibration T1 et T2 utilisés.

Tableau 3.16 : Variation des propriétés selon les temps de vibration T1 et T2.

Propriétés	Calculs	Vibro-A		Vibro-B		Vibro-C		Vibro-D	
		T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
Résistance en flexion (%)	Moyenne	70,43	75,24	76,43	73,93	73,95	68,12	72,00	72,51
	Écart type	4,74	4,07	7,58	6,81	8,93	4,20	6,38	14,02
Résistance en compression (%)	Moyenne	73,30	79,42	83,61	90,95	68,68	65,39	62,26	71,69
	Écart type	11,08	7,97	8,69	6,78	12,83	9,18	12,33	8,89
Module de Young (%)	Moyenne	53,45	58,90	57,28	59,59	51,10	48,78	49,82	54,71
	Écart type	5,44	5,30	2,68	2,03	7,27	5,08	10,14	7,17
Densité apparente (%)	Moyenne	96,37	97,06	96,99	97,74	94,94	94,50	95,66	95,70
	Écart type	1,41	1,42	1,10	0,40	2,38	1,14	1,02	1,36
Résistivité électrique (%)	Moyenne	15,54	14,77	14,98	9,97	24,03	22,22	27,73	34,52
	Écart type	8,95	8,16	10,18	0,59	15,92	13,73	22,98	30,24

L'analyse de la variation des moyennes des résistances en flexion pour les temps de vibration T1 et T2 montre que dans certains cas (vibro-compacteur B et C), il a été l'utilisation du temps de vibration T1 qui donné des propriétés élevées comparées au temps T2 (sachant que T1 est inférieur à T2 de sept secondes).

Du côté de l'analyse de la variation de la moyenne de la résistance en compression, du module de Young et de la densité apparente pour les temps de vibration T1 et T2, les résultats ont montré que c'est le temps de vibration T1 qui a donné des propriétés supérieures dans le cas du vibro-compacteur C. Ce vibro-compacteur est le seul à avoir un pourcentage de mégot faible de 12 % (voir tableau 3.3) comparé aux autres vibro-compacteurs. Cependant, la moyenne générale de ces propriétés pour ce vibro-compacteur est faible par rapport aux autres puisque le mégot apporte des propriétés mécaniques et des densités élevées. Durant la campagne de 2011, ce vibro-compacteur a donné des propriétés supérieures comparées aux autres sachant qu'ils avaient tous le même matériel.

Pour ce qui est de la résistivité électrique, le vibro-compacteur D présente des résistivités faibles au temps T1 comparé au temps T2. L'écart type obtenu pour le cas de ce vibro-compacteur est élevé, car il existe une grande différence entre les résistivités électriques pour les parties du haut et du bas des échantillons de ce vibro-compacteur.

3.3.4. Variation des accélérations-Campagne 2012

Les comparaisons des mesures d'accélération en RMS normalisées des huit anodes crues de la campagne de 2012 sont présentées dans cette section. Comme toujours, c'est l'approche ANOVA factorielle de Statistica® qui est utilisée pour le traitement des

résultats. Les valeurs de p obtenus pour les différentes accélérations de table et de tige ainsi que les différences d'accélération entre la table et la tige en fonction des quatre vibro-compacteurs sont montrés au tableau 3.17 pour un intervalle de confiance de 95 %. Les graphes obtenus pour les accélérations de la tige guide, les accélérations de la table de vibration et la différence d'accélération entre la table et la tige sont montrées respectivement aux figures suivantes : figure 3.24, figure 3.25 et figure 3.26.

Les valeurs de p obtenus dans le cas de l'analyse des mesures d'accélération sont vraiment petites et nettement inférieures à 0,05. Donc statistiquement, il existe une différence entre les accélérations de la table et de la tige ainsi que la différence d'accélération pour la table et la tige entre les quatre vibro-compacteurs étudiés.

Tableau 3.17 : Valeurs de p pour les mesures d'accélération-Anodes-2012.

Accélérations-RMS-2012	Valeur de p	Intervalle de confiance
Accélération de la table	0,00000	0,95
Accélération de la tige	0,00000	0,95
Différence d'accélération	0,00000	0,95

L'analyse de variance des accélérations de la tige guide à la figure 3.24 montre que les vibro-compacteurs A et B ont des accélérations de tige élevées comparées aux vibro-compacteurs C et D. Les vibro-compacteurs C et D dévoilent des accélérations de table élevées comparées aux vibro-compacteurs A et B comme c'est présenté à la figure 3.25. La comparaison des accélérations de la table avec la tige montre bien que les accélérations de

la table sont élevées comparées à celles de la tige. Cette différence d'accélération est normale, car l'accélération de la table est générée par les excentriques qui sont entraînés en rotation par un moteur. Par la suite, cette accélération de table est transmise à la tige en passant à travers la pâte d'anode. Donc, c'est normal que l'accélération de la tige soit faible comparé à celle de la table. Cependant, la figure 3.26 montre que la différence d'accélération entre la table et la tige est plus élevée pour le cas des vibro-compacteurs C et D sachant que ces deux derniers ont des accélérations de table élevées, mais qui ne se sont pas transmises à la tige.

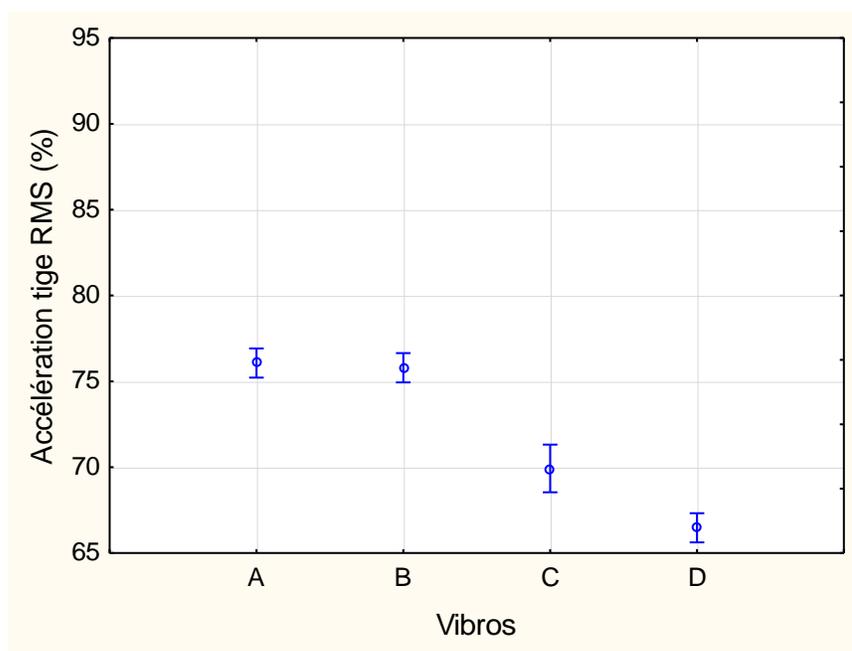


Figure 3.24 : Variation de l'accélération de la tige-Anodes 2012.

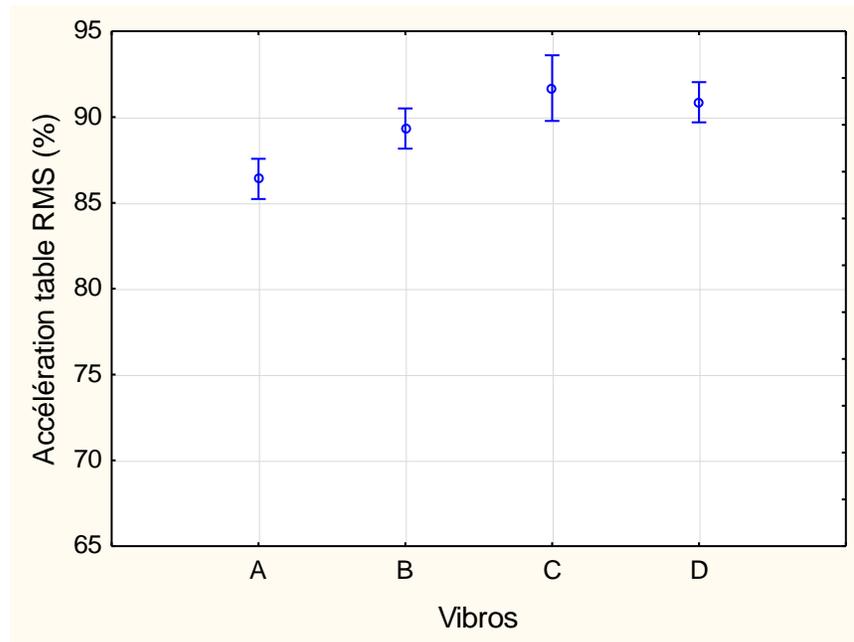


Figure 3.25 : Variation de l'accélération de la table-Anodes 2012.

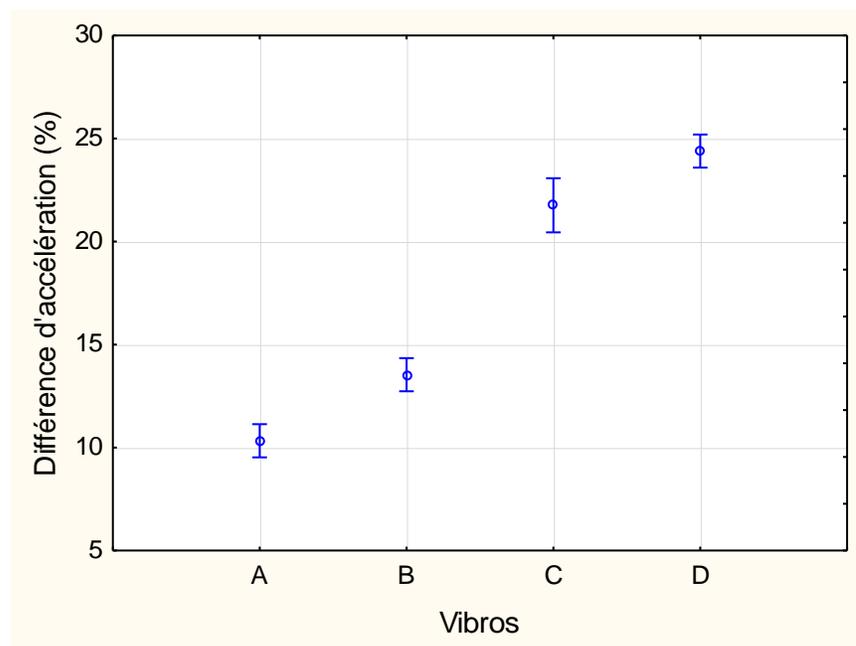


Figure 3.26 : Variation de la différence d'accélération entre table et tige-Anodes 2012.

Le tableau 3.18 présente les moyennes et les écarts types obtenus sur les huit anodes pour les mesures d'accélération de cette campagne de 2012.

Tableau 3.18 : Variation des accélérations des quatre vibro-compacteurs.

Vibro-compacteur	Calculs	Accélération tige (%)	Accélération table (%)	Différence d'accélération (%)
A	Moyenne	76,07	86,40	10,33
	Écart type	1,79	2,70	1,69
B	Moyenne	75,79	89,33	13,54
	Écart type	2,15	2,21	1,26
C	Moyenne	69,93	91,69	21,76
	Écart type	0,58	1,16	1,00
D	Moyenne	66,47	90,86	24,39
	Écart type	1,29	2,35	1,95

Une vérification de ce qui se passe au niveau des anodes formées est réalisée en ayant en main ce résultat de différence d'accélération entre la table et la tige. Il s'est avéré que les vibro-compacteurs qui présentent de plus grandes différences d'accélération forment des anodes ayant des variations statiquement élevées entre les propriétés physiques et mécaniques des parties du bas et du haut de l'anode comme illustrée à la section 3.3.2. Donc, les variations des accélérations générées par ces vibro-compacteurs affectent la qualité des anodes formées.

Une constatation a été faite, la différence d'accélération entre la table et la tige est plus prononcée pour le cas du vibro-compacteur D qui a entraîné par le fait même une grande différence pour les propriétés des anodes du haut et du bas. Les analyses réalisées dans le groupe de recherche dans un autre projet sur la fissuration montrent que le vibro-

compacteur D forme plus d'anodes avec des fissures horizontales qui par la suite sont considérées comme étant des anodes rejetées. Donc, cette différence d'accélération peut être une des causes de la création de ces fissures horizontales.

Les isolations vibratoires sur lesquels s'appuient les vibro-compacteurs ont évolué au fil du temps. Au départ, ce sont les ressorts en acier qui ont été utilisés, par la suite les fabricants ont passé au bloc de caoutchouc. Actuellement, ce sont les ballons gonflables à air comprimé qui sont employés. Durant le passage entre ces trois catégories d'isolation vibratoire, une amélioration au niveau des propriétés des anodes formées est constatée. Avec les isolations en acier et en caoutchouc, les propriétés des anodes du bas sont plus faibles comparées à celle du haut, mais avec le passage vers les ballons gonflables, cet écart a nettement diminué. Le principe des isolations à ballons gonflables est qu'elles ne laissent pas l'énergie de vibration se dissiper au niveau du sol, au moins une grande partie, donc, cette énergie est réutilisée. En utilisant les isolations à ballons gonflables, les fabricants des vibro-compacteurs ont constaté que le signal des vibrations de la table est devenu bien plus clair en présentant de belles courbes de sinus d'entrée d'excitation.

3.3.5. Comparaison des accélérations des quatre coins de la table-Campagne 2012

En utilisant Matlab®, les cartographies des accélérations en RMS normalisées pour les quatre coins de table des quatre vibro-compacteurs industriels en 3-D sont tracées. Ces cartographies des vibro-compacteurs A, B, C et D sont présentées respectivement aux figures suivantes : figure 3.27, figure 3.28, figure 3.29 et figure 3.30. Les mesures prises en considération lors des analyses représentent la moyenne des accélérations obtenues sur les

trente-deux anodes de la campagne de 2012 formées aux deux temps de vibration T1 et T2 pour chaque vibro-compacteur sachant que $T2 > T1$.

La figure 3.27 montre que les coins B et D du vibro-compacteur A vibrent plus que les deux autres coins. Ces deux coins qui vibrent plus représentent le côté gauche de l'anode à la figure 3.2. Pour ce qui est du vibro-compacteur B de la figure 3.28, le coin D vibre bien plus que les autres coins de la table. Ce fait a conduit à la fissuration de la table de vibration au coin B montré à la figure 3.31 qui se situent juste à côté de ce coin ayant de fortes accélérations. Cette fissuration est survenue quelque temps après ces mesures. La table fissurée a été changée par la suite.

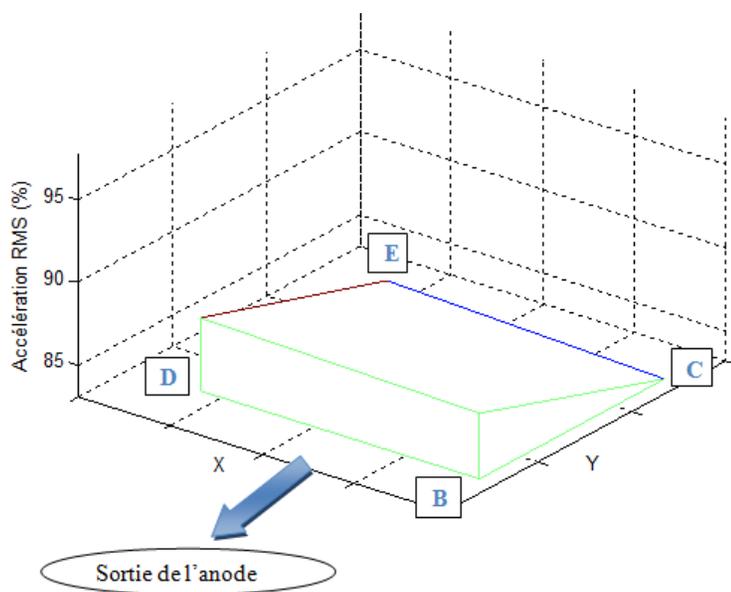


Figure 3.27 : Accélération de la table du vibro-compacteur A-Campagne 2012.

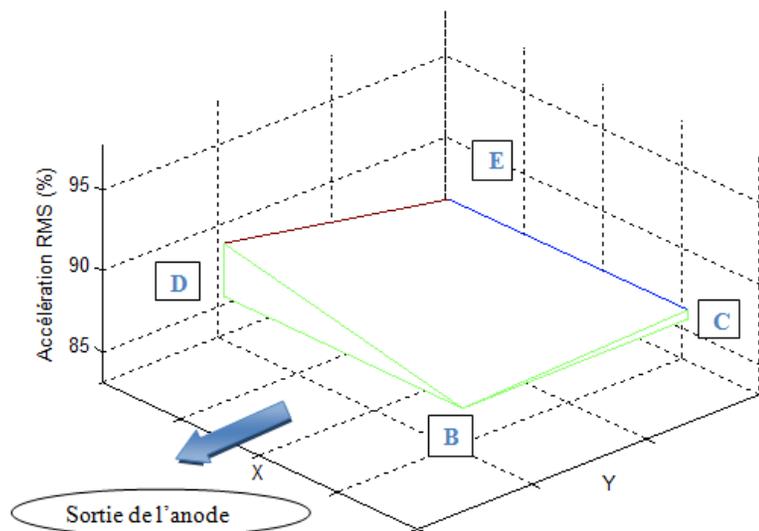


Figure 3.28 : Accélération de la table du vibro-compacteur B-Campagne 2012.

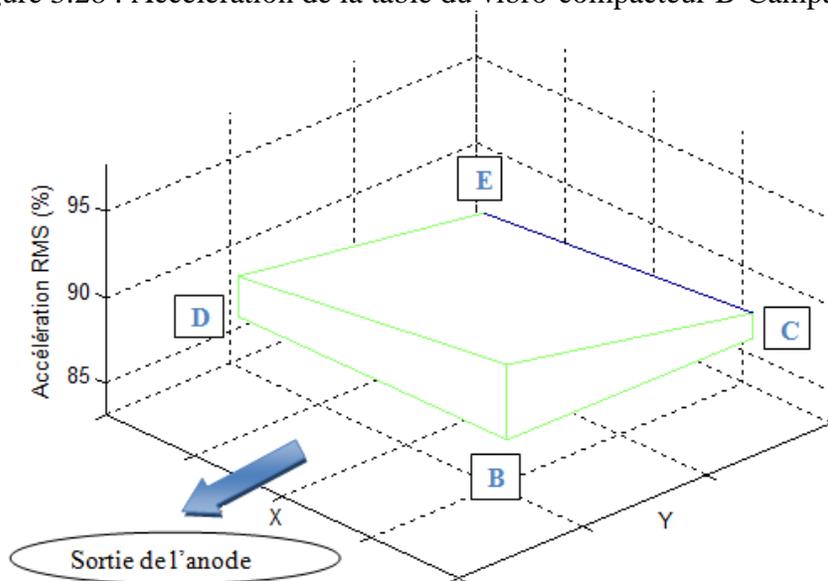


Figure 3.29 : Accélération de la table du vibro-compacteur C-Campagne 2012.

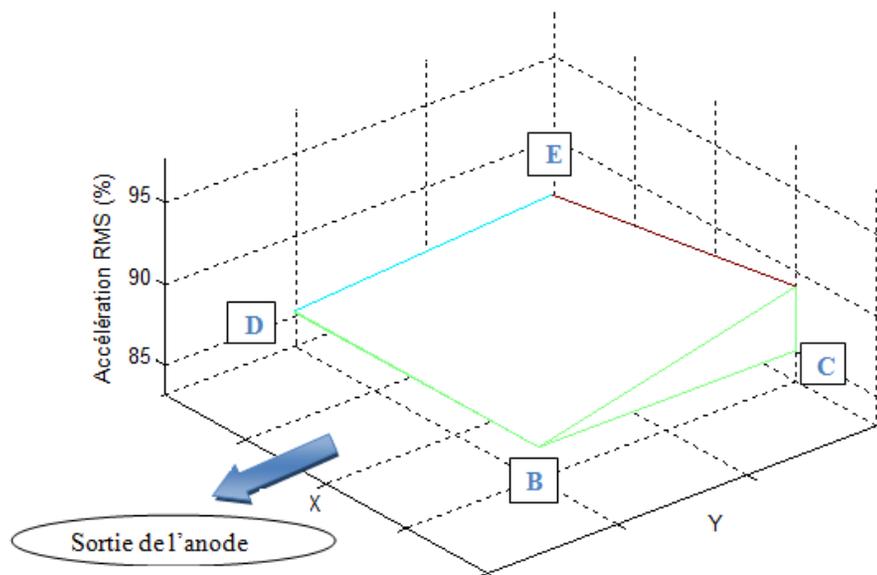


Figure 3.30 : Accélération de la table du vibro-compacteur D-Campagne 2012.

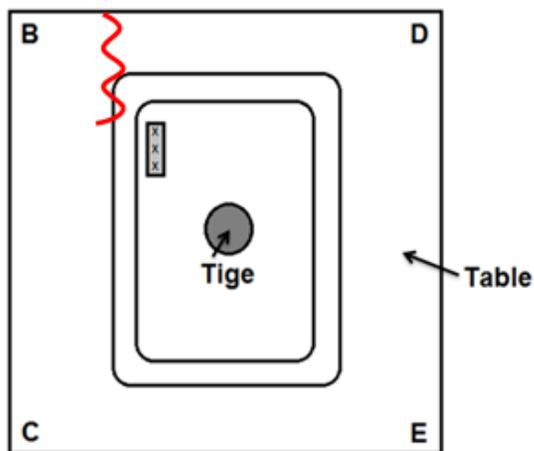


Figure 3.31 : Position de la fissure pour la table du vibro-compacteur B.

Quant au vibro-compacteur C, le coin E présente des accélérations un peu plus faibles et les accélérations du coin B un peu plus élevées. Donc, dans le cas de ce vibro-compacteur, le niveau de la table est acceptable. Pour ce qui est du vibro-compacteur D, les

coins C et E montrés à la figure 3.2 présentent des accélérations élevées. Ces différences d'accélération sont la plus part du temps due aux forces générées par les balourds sur les quatre coins de la table de vibration. Dans ce cas d'étude et pour ces conditions d'opération, la différence d'accélération entre les quatre coins de la table de vibration ne présente pas de lien direct avec les propriétés physiques et mécaniques des anodes formées et cela a été validé par l'analyse en composante principale présentée au tableau 3.19 et tableau 3.20. Ces différences d'accélération influencent beaucoup plus le comportement mécanique du vibro-compacteur conduisant ainsi à des bris au niveau des équipements (table, moule, etc.).

3.3.6. Corrélation entre les différentes propriétés-Campagne 2012

Afin de faire le lien entre les analyses effectuées sur les mesures d'accélération, les propriétés physiques et mécaniques des positions en haut et en bas de l'anode et selon le temps de vibration de la campagne de 2012, la méthode de l'analyse en composantes principales est aussi utilisée comme pour la section 3.3.1. Le tableau 3.19 montre les valeurs de p de la matrice de corrélation obtenue pour les mesures d'accélération de la campagne de 2012.

Tableau 3.19 : Valeurs de p des mesures d'accélération-Campagne 2012.

Paramètres	Accélération tige	Accélération table	Différence-accélération
Vibro-compacteurs	$4,43 \times 10^{-37}$	$1,97 \times 10^{-09}$	$2,11 \times 10^{-41}$
Type de coke	0,0023	$2,13 \times 10^{-05}$	$2,52 \times 10^{-05}$
Type de brai	0,0023	$2,13 \times 10^{-05}$	$2,52 \times 10^{-05}$
% Mégot	0,0016	0,0018	$4,88 \times 10^{-05}$
Temps de vibration	0,304	0,78	0,42

Pression de charge	$1,64 \times 10^{-22}$	0,27	$8,64 \times 10^{-13}$
Coins de table	0,46	0,54	0,73
Vitesse table	$9,72 \times 10^{-08}$	$4,12 \times 10^{-06}$	$3,39 \times 10^{-10}$
Vitesse tige	$1,86 \times 10^{-09}$	0,0012	$2,73 \times 10^{-12}$
Accélération tige	0,0012		$8,14 \times 10^{-19}$
Accélération table		$2,95 \times 10^{-05}$	$4,58 \times 10^{-36}$

Les variables indépendantes d'entrée qui sont prises en considération sont : les vibro-compacteurs, types de coke et de brai, pourcentage de mégot, temps de vibration, pression de charge, quatre coins de table, vitesse de la table et de la tige, accélération de la tige et de la table de vibration. Le classement de ces valeurs de p selon leurs fortes dépendances pour les paramètres étudiés est montré au tableau 3.20. Ces résultats montrent que les vibro-compacteurs, la pression de charge et les vitesses de vibration ont une très grande influence sur l'accélération de la tige. Par la suite, c'est les matières premières qui influencent à leurs tours sur les mesures d'accélération. Pour ce qui est des accélérations de la table, elles sont influencées en premier par les vibro-compacteurs, mais juste après ce sont les types de coke et de brai utilisés, puis c'est l'accélération et la vitesse de la tige ainsi que le mégot. Par la suite, pour ce qui est des différences d'accélération, en premier lieu ce sont les paramètres du vibro-compacteur (type de vibro-compacteurs, accélération, pression, vitesse), puis ce sont les matières premières.

Tableau 3.20 : Liste de paramètres à forte dépendance : Mesures d'accélération.

Paramètres	Accélération tige	Accélération table	Différence-accélération
Vibro-compacteurs	1	1	1
Type de coke	7	3	7
Type de brai	8	4	8
% Mégot	6	7	9
Temps de vibration			
Pression de charge	2		4
Coins de table			
Vitesse table	4	2	6
Vitesse tige	3	6	5
Accélération tige		5	2
Accélération table	5		3

Dans ce cas d'étude, la vitesse de vibration du vibro-compacteur D était supérieure à celle du vibro-compacteur B de 30 RPM (voir tableau 3.2 et tableau 3.3). Ces deux vibro-compacteurs avaient les mêmes matières premières, mais avec des pressions de charge différentes. La pression de charge du vibro-compacteur D est inférieure à celle du vibro-compacteur B de 20 psi. Les résultats des caractérisations physiques et mécaniques des anodes provenant de ces deux vibro-compacteurs ont montré que c'est le vibro-compacteur B qui avait des propriétés élevées comparées au vibro-compacteur D. D'après la littérature, lorsque la vitesse de vibration augmente, les différentes propriétés augmentent aussi (voir section 2.3.2), mais dans ce cas d'étude, ce n'était pas le cas. Cela est dû au faite que l'influence de la pression de charge présentée au tableau 3.19 et au tableau 3.20 (deuxième

position- $1,64 \times 10^{-22}$) est plus importante comparée à la vitesse de vibration de la tige et la table respectivement (troisième et quatrième $1,86 \times 10^{-09}$ et $9,72 \times 10^{-08}$). Le tableau 3.21 montre les valeurs de p de la matrice de corrélation obtenues pour les résultats des caractérisations physiques et mécaniques de la campagne de 2012.

Tableau 3.21 : Valeurs de p des caractérisations physiques et mécaniques-Campagne 2012.

Paramètres	Résistance en flexion	Résistance en compression	Module de Young	Densité apparente	Résistivité électrique
Vibro-compacteurs	0,69	$1,15 \times 10^{-05}$	0,001	$2,45 \times 10^{-06}$	$2,53 \times 10^{-06}$
Temps de vibration	0,98	0,021	0,037	0,098	0,92
Type de coke	0,64	0,048	0,17	0,018	0,33
Type de brai	0,64	0,049	0,17	0,018	0,33
% Mégot	0,75	0,001	0,001	$1,91 \times 10^{-08}$	0,28
Pression de charge	0,34	$1,04 \times 10^{-12}$	$4,72 \times 10^{-05}$	$2,13 \times 10^{-09}$	$1,15 \times 10^{-06}$
Répartition G-C-D	0,59	0,42	0,70	0,51	0,20
Position H-B	$4,38 \times 10^{-05}$	$8,86 \times 10^{-06}$	$1,97 \times 10^{-05}$	$1,82 \times 10^{-10}$	$6,80 \times 10^{-13}$

Les variables indépendantes d'entrée qui sont prises en considération sont : les vibro compacteurs, temps de vibration, types de coke et de brai, pourcentage de mégot, pression de charge, répartition gauche centre et droite des échantillons et les positions en haut et en bas dans l'anode. Le classement de ces valeurs de p selon leurs fortes dépendances pour les paramètres étudiés est présenté au tableau 3.22.

Tableau 3.22 : Liste de paramètres à forte dépendance: Propriétés physiques et mécaniques.

Paramètres	Résistance en flexion	Résistance en compression	Module de Young	Densité apparente	Résistivité électrique
Vibro-compacteurs		3	4	4	3
Temps de vibration		5	5		
Type de coke		6		5	
Type de brai		7		6	
% Mégot		4	3	3	
Pression de charge		1	2	2	2
Répartition G-C-D					
Position H-B	1	2	1	1	1

Les analyses du tableau 3.22 montrent qu'il n'y a que la position du haut et du bas des échantillons qui influe sur la résistance en flexion parmi les paramètres indépendants d'entrée énumérés en haut. La résistance en compression est influencée par la pression, les positions des échantillons, les vibro-compacteurs, les matières premières et le temps de vibration. Le module de Young est influencé par moins de paramètres comparés à la résistance en compression. Ce sont les types de coke et de brai qui n'affectent pas sur le module de Young dans ce cas d'étude. Pour ce qui est de la densité apparente, c'est juste le temps de vibration et la répartition des échantillons dans l'anode (gauche-centre-droite) qui ne l'influencent pas. Toujours dans ce cas d'étude d'anodes crues, la résistivité électrique est seulement influencée par la position des échantillons (haut-bas), la pression de charge et les vibro-compacteurs.

3.4. Conclusions

Dans ce chapitre, la méthodologie ainsi que les résultats et la discussion des tests et des analyses de deux campagnes de mesures sont présentés. La première campagne réalisée en 2011 porte sur la caractérisation physique et mécanique selon les trois axes de quatre anodes crues provenant de quatre vibro-compacteurs industriels différents. Les analyses des résultats obtenus montrent que les résistances en flexion varient d'un axe à un autre. Pour ce qui est de la résistance en compression ainsi que la densité apparente, ces dernières sont affectées par les répartitions de gauche, de centre et de droite des échantillons ainsi que les positions en haut et en bas de l'anode. Le module de Young varie avec la variation des répartitions des échantillons de même que les types de vibro-compacteurs. La résistivité électrique varie selon les types de vibro-compacteurs et aussi la position en haut et en bas des échantillons.

Les propriétés des échantillons situées entre les trous de formage sont variables à cause des répartitions de la pâte dans le moule et aussi aux trous de formage qui ne favorisent pas le déplacement des particules. Les échantillons situés en bas des trous de formage ont des propriétés élevées, c'est à ce niveau qu'il est possible de détecter visuellement si une anode est sur-compacté ou non (augmentation de la présence de microfissures horizontales sur les échantillons en dessous des trous de formage).

Les échantillons du bas de l'anode de la campagne de 2012 présentent des caractéristiques faibles comparées à ceux situés en haut de l'anode. Cet écart est plus prononcé dans le cas des vibro-compacteurs C et D comparés aux deux autres. Au niveau

des mesures d'accélération, il existe des différences d'accélération plus élevées entre la table et la tige des vibro-compacteurs C et D par rapport aux vibro-compacteurs A et B. Cette situation peut être améliorée en travaillant sur les isolations vibratoires ainsi que les pressions de charge.

Statistiquement, il n'existe pas de différence entre les propriétés des anodes crues de la campagne de 2012 formées aux deux temps de vibration T1 et T2, sachant que T1 est inférieur à T2 de 7 secondes.

Les accélérations des quatre coins de la table du vibro-compacteur C sont stables par rapport aux accélérations des autres vibro-compacteurs. Les cartographies des tables des vibro-compacteurs A et D montrent deux coins qui vibrent plus que d'autres. Un des coins de la table du vibro-compacteur B vibre plus que tous les autres coins, cette situation a conduit à la fissuration de cette table de vibration. Lorsque la principale fonction d'une machine est la vibration, la présence de faibles jeux ou un faible manque au niveau de l'alignement de la table se voit amplifier avec les vibrations causant ainsi le bris des composantes de la machine. La tolérance d'ajustement au niveau des pièces mécaniques des vibro-compacteurs doit être vraiment élevée.

CHAPITRE 4

CONCEPTION ET CALIBRATION D'UN VIBRO-COMPACTEUR DE LABORATOIRE

4.1. Introduction

Les données des vibro-compacteurs fournies par le partenaire industriel et tirées de la littérature ont été évaluées par l'équipe de vibro-compactage de la Chaire UQAC/AAI sur le carbone. Ces données ont été utilisées selon leurs importances et leurs variations afin de décider quels sont les paramètres nécessaires pour la conception du vibro-compacteur du laboratoire. Par la suite, une compagnie externe a été contactée afin de fabriquer cet équipement. Les paramètres de conception du vibro-compacteur prédominant pris en considération ont été établis par l'équipe de vibro-compactage de la Chaire UQAC/AAI et fournis à la compagnie externe. Une fois sur place, la calibration du banc d'essai ainsi que des différents paramètres du vibro-compacteur ont commencé.

Ce chapitre comprend des sections analytiques ainsi qu'expérimentales portant sur la calibration et la conception du vibro-compacteur du laboratoire. La première section présente les principaux paramètres pris en considération lors de la comparaison du vibro-compacteur industriel à celui du laboratoire. La deuxième section englobe les propriétés du vibro-compacteur du laboratoire ainsi que les différentes calibrations faites après son acquisition. Par la suite, la troisième section comprend des cartographies de la table de

vibration établies en réalisant des tests de mesures vibratoires à différentes positions. La dernière section de ce chapitre est consacrée aux mesures vibratoires à vide effectuées avec des vitesses et des déplacements variables afin d'établir les plages d'opération admissibles du vibro-compacteur.

4.2. Comparaison entre vibro-compacteur industriel et celui du laboratoire

Afin de pouvoir comprendre les mécanismes de fonctionnement ainsi que les éléments constituant les vibro-compacteurs, la documentation existante sur les vibro-compacteurs a été passée en revue. Le tableau 4.1 présente un récapitulatif des comparaisons des paramètres de conception du vibro-compacteur du laboratoire.

Tableau 4.1 : Paramètres de conception du vibro-compacteur du laboratoire.

Vibro-compacteurs	Industrie		Laboratoire	
	Revue de littérature [70]	UQAC	Hydro-Al [71]	
Amplitude	2 à 6 mm	1-5 mm	0,8-1,2 mm	
Masse de l'anode	Environ 1 tonne	10 kg	5 kg	
Temps de vibration	35 à 120 s	10 à 120 s	30 à 150 s	
Vitesse de vibration	1200 à 1700 RPM	900 à 2100 RPM	0 à 3000 RPM	
Charge morte	4000 à 8000 kg		320 kg	

Afin d'obtenir la charge à appliquer sur une anode du laboratoire, des calculs liant la pression de charge d'une anode industrielle à celle du laboratoire ont été établis. La pression de charge est égale à la force sur la surface. Pour chaque anode, qu'elle soit industrielle ou de laboratoire, la surface est connue, donc il reste à déterminer la charge morte à appliquer sur l'anode du laboratoire. Prenant comme exemple une anode

industrielle de $1300 \times 500 \times 480 \text{ mm}$ comme dimensions et une charge morte égale à 4000 kg. Pour ce qui est de l'anode du laboratoire, ces dimensions sont de $300 \times 180 \times 180 \text{ mm}$; alors, son équivalent en charge morte est calculé comme suit :

$$P = \frac{F}{S} \quad (4.1)$$

P : pression [N/mm^2].

F : force [N].

S : surface [mm^2].

La surface totale de l'anode est calculée comme suit :

$$S_{\text{anode-Industrie}} = 1300 \times 500 = 650\,000 \text{ mm}^2$$

d'où :

$$P = \frac{F_{\text{vibro-industrie}}}{S_{\text{anode-industrie}}} = \frac{4000 \times 9,81}{650\,000} = 0,06 \text{ N}/\text{mm}^2$$

$$P = 0,06 \text{ N}/\text{mm}^2$$

Trouvons maintenant la force à appliquer sur l'anode du laboratoire :

$$P = \frac{F_{\text{vibro-uqac}}}{S_{\text{anode-laboratoire}}}$$

$$S_{\text{anode-laboratoire}} = 300 \times 180 = 54\,000 \text{ mm}^2$$

donc :

$$F_{\text{vibro-laboratoire}} = 0,06 \times 54\,000 = 30559,94 \text{ N}$$

$$F_{\text{vibro-laboratoire}} \approx 332,31 \text{ kg}$$

Donc, la force qu'il faut appliquer sur l'anode du laboratoire est de 332,31 kg. Cette force ne comprend pas la force des ballons en supplément à la charge morte. La force du

ballon de charge est utilisée pour compléter la charge totale. Le ballon de charge ne joue pas seulement un rôle de charge, mais aussi un rôle important permettant de synchroniser la vibration de la table avec la tige guide permettant ainsi de travailler plus efficacement.

Des modifications ont été apportées au niveau de la conception du vibro-compacteur afin de le rendre plus performant avec l'aide du groupe de recherche sur le carbone UQAC/AAI. La figure 4.1 présente le modèle de vibro-compacteur du laboratoire.



Figure 4.1 : Vibro-compacteur du laboratoire [UQAC].

4.3. Calibration du vibro-compacteur

Cette section est consacrée à la calibration du vibro-compacteur du laboratoire de l'UQAC ainsi que les équipements de mesure vibratoire. En premier lieu, les calibrations faites au niveau du système de charge sont présentées. Par la suite, les calibrations réalisées au niveau de la charte des vitesses sont exposées. En troisième lieu vient le tour des

équipements de mesure vibratoire où le principe et les conditions d'utilisation des accéléromètres sont expliqués.

4.3.1. Calibration du système de charge

La calibration du système de charge de la figure 4.2 présentée dans cette partie est appliquée à notre procédure d'opération standard de fabrication des anodes du laboratoire. Le système de charge est composé de deux parties, une charge comprenant un ensemble de plaques superposées et un ballon de pression. La pression du ballon de charge varie de 0 à 120 psi. La charte des pressions du ballon en fonction de la hauteur qui est fournie par le fabricant est présentée à la figure 4.3. Le maximum de pression de charge recommandée par le fabricant est de 90 psi donc 465 kg.

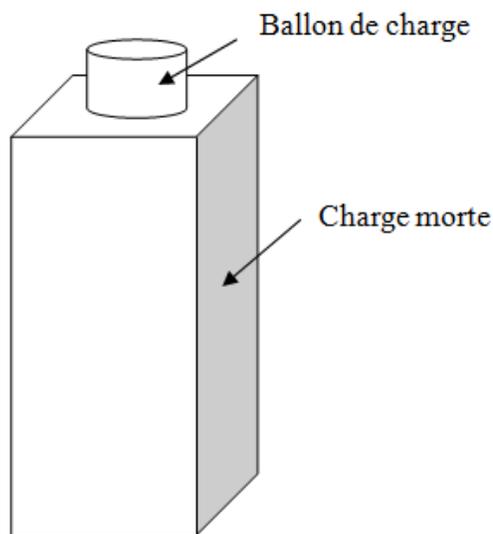


Figure 4.2 : Système de charge du vibro-compacteur du laboratoire.

Afin de vérifier les charges obtenues pour les différentes pressions, des séries de tests de calibration du ballon de charge ont été réalisées. Le test consiste à placer le ballon sur

une presse hydraulique équipée de balances pour mesurer la masse obtenue à chacune des pressions. Durant les essais, il faut attendre jusqu'à la stabilisation de la pression du ballon. Le tableau 4.2 montre les résultats des charges normalisées par rapport à la valeur maximale de charge obtenus pour différentes pressions et différentes hauteurs du ballon.

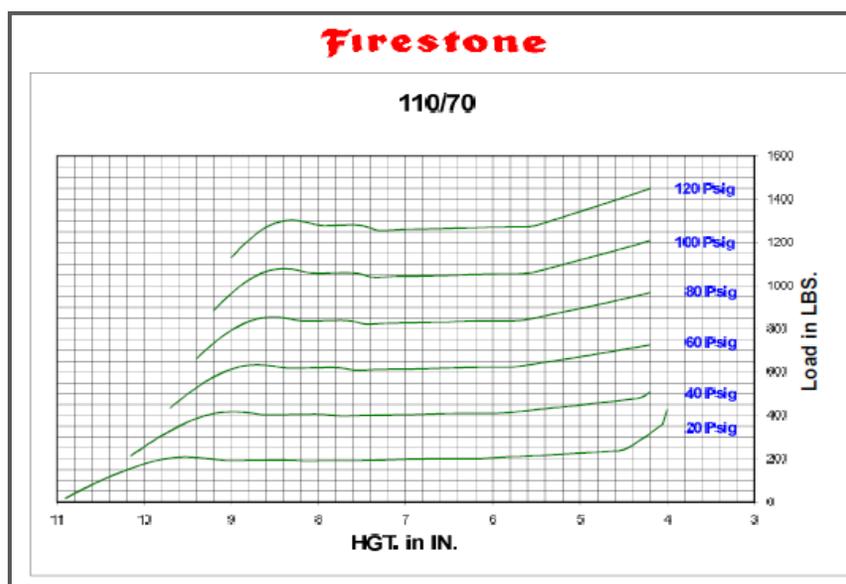


Figure 4.3: Charte de la variation de la pression du ballon de charge.

Tableau 4.2 : Variation de la charge (%) en fonction de la pression et de la hauteur.

Hauteur (po)	Pression (psig)						
	20	25	35	40	60	80	90
4	20,93	28,55	37,40	43,70	64,54	87,44	100,00
5	16,96	23,44	31,23	36,74	56,78	79,63	92,84
6	15,62	19,27	28,61	33,77	52,44	74,12	85,77
7	11,81	17,38	27,27	32,20	51,17	73,30	84,80
8	11,72	17,00	26,48	31,37	51,67	73,96	84,85

L'analyse des résultats montre que la charge du ballon est plus stable pour les hauteurs qui varient entre 0,18 et 0,20 mètre (7 à 8 pouces). La hauteur du ballon augmente avec l'augmentation de la pression de charge, elle est affectée par la hauteur de la pâte d'anode dans le moule. Donc, durant la fabrication des anodes du laboratoire, il faut équilibrer le système afin de travailler avec une hauteur de ballon comprise entre 7 à 8 pouces.

4.3.2. Calibration de la vitesse de vibration

En utilisant un tachéomètre à laser, une calibration expérimentale de la charte des vitesses donnée par le fournisseur est réalisée au niveau du laboratoire. L'équipement utilisé pour les mesures de vitesse est présenté à la figure 4.4. Les mesures de vitesse sont prises sur l'arbre du moteur. Le tableau 4.3 présente une comparaison des chartes de vitesse du vibro-compacteur UQAC.



Figure 4.4 : Position de mesure de la vitesse de vibration avec le tachéomètre.

D'après le fournisseur, les vitesses d'opération peuvent varier de 875 RPM à 2041,7 RPM pour des fréquences de 30 Hz à 70 Hz. Cependant, lors des mesures effectuées au

laboratoire à vide, les résultats montrent que 30 Hz correspond à 900 RPM au lieu de 875 RPM et 70 Hz correspond à 2100 RPM au lieu de 2041,7 RPM. Une comparaison des vitesses obtenues à vide et avec anode pour le cas d'une anode standard montre le même résultat de vitesses. Donc, cette calibration est directement appliquée à la procédure standard de fabrication des anodes au laboratoire.

Tableau 4.3 : Comparaison des chartes de vitesses réelles/nominales

Fréquence (Hz)	Vitesse mesurée UQAC (RPM)	Vitesse calculée fabricant (RPM)
30	900	875,0
35	1050	1020,7
40	1200	1166,7
45	1350	1312,5
50	1500	1458,3
55	1650	1604,2
60	1800	1750,0
65	1950	1895,8
70	2100	2041,7

4.3.3. Équipements et procédures de mesures vibratoires

Dans cette section, les équipements de mesure vibratoire acquis dans le laboratoire ainsi que le principe et les conditions de leur utilisation sont présentés. Ces équipements sont constitués de deux accéléromètres à base magnétique, d'un système d'acquisition de données brutes ainsi que d'un châssis du système d'acquisition. Le tout est connecté à l'ordinateur pour l'acquisition des données. L'ensemble de ces équipements avec leurs caractéristiques sommaires sont présentés au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Équipements de mesure vibratoire.

Matériel	Modèle	Quantité	Numéro de série	Caractéristique
Accéléromètre		2	AC208-5C/010/010-Z	De -50 à 150 °C, ±80g
Base magnétique		2	MH140-1A	Résistance à la traction 54 kg
Système d'acquisition		1	NI 9232	03 canaux, ±30V, Échantillonnage 102,4ks/s par canal
Châssis du système d'acquisition		1	cDAQ-9171	Élimine les bruits environ

Afin de pouvoir faire les mesures vibratoires en utilisant ces équipements, il faut suivre les étapes suivantes :

- **Installation de la chaine de mesure vibratoire**

Cette chaine représente les étapes du processus de mesure vibratoire. Pour ce faire, il faut fixer les câbles des accéléromètres aux canaux du système d'acquisition, installer les fixations pour les mises à la terre, brancher le système d'acquisition à l'ordinateur et fixer les aimants sur les accéléromètres.

- **Création d'une route**

Pour les mesures vibratoires sur l'interface Labview®, les étapes suivantes doivent être établies avant toute mesure :

- Le type de mesure accélération ou autres
- Les canaux à prendre en considération pour les mesures
- Le temps de mesure
- L'échantillonnage
- Les limites d'accélération
- Le mode de sauvegarde des résultats et leurs exportations.

Pour finir, il faut faire un test de vérification de la chaine de mesure avant de commencer les mesures vibratoires ainsi qu'une vérification du bon fonctionnement des accéléromètres.

- **Principe et condition d'utilisation des accéléromètres [105]**

Un accéléromètre est un capteur qui est fixé directement sur la structure dont l'opérateur veut mesurer les vibrations. Comme il vibre avec la structure, il ne mesure pas le mouvement absolu $V_1(t)$ de la structure tel que désiré, mais un mouvement relatif $V_3(t)$ qu'il faudra interpréter pour extraire l'information sur le mouvement absolu. Le mouvement relatif $V_3(t) = V_2(t) - V_1(t)$ tel que présenté à la figure 4.5.

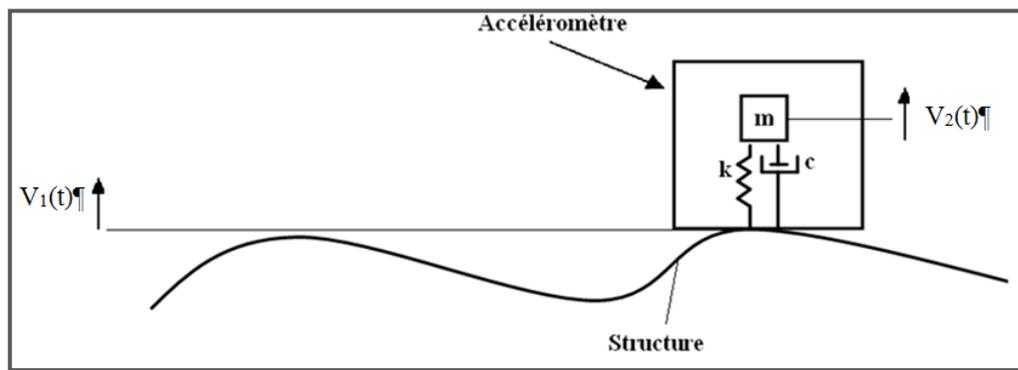


Figure 4.5 : Modélisation d'un accéléromètre.

L'accéléromètre doit être fixé sur une partie fixe de la machine aussi près que possible des éléments en mouvement. Le montage doit se faire dans une direction verticale pour que son axe de mesure coïncide avec le plan de rigidité minimale de la structure. Il peut aussi être fixé dans une direction horizontale. Le poids de l'accéléromètre doit être au moins 10 fois inférieur au poids du vibro-compacteur afin que la masse ajoutée de l'accéléromètre n'altère pas la fréquence de vibration du vibro-compacteur.

Avant l'achat d'un accéléromètre, il est nécessaire d'estimer la valeur de la gamme de fréquences qui doit être couverte et vérifier que cette valeur est compatible avec la

gamme de fréquences couvertes par l'accéléromètre. Il faut aussi vérifier que la gamme dynamique de l'accéléromètre (g) est adéquate pour les mesures qui doivent être prises. D'un autre côté, il est primordial de vérifier que la température de fonctionnement maximal admissible de l'accéléromètre est suffisante pour le montage de mesure considéré. Une exposition à une trop haute température entraîne ainsi une perte de sensibilité autrement il faut prévoir un système de refroidissement.

4.4. Cartographie de la table de vibration

En prenant des mesures vibratoires à vide pour différentes positions sur la table, deux cartographies de la table de vibration du vibro-compacteur du laboratoire ont été établies. Des tests avec les paramètres d'opération standard du laboratoire sont réalisés. Les positions des points de mesure sont présentées à la figure 4.6. La figure 4.7 présente le montage qui est utilisé durant les essais. Deux accéléromètres sont utilisés, donc c'est possible de mesurer deux points à la fois.

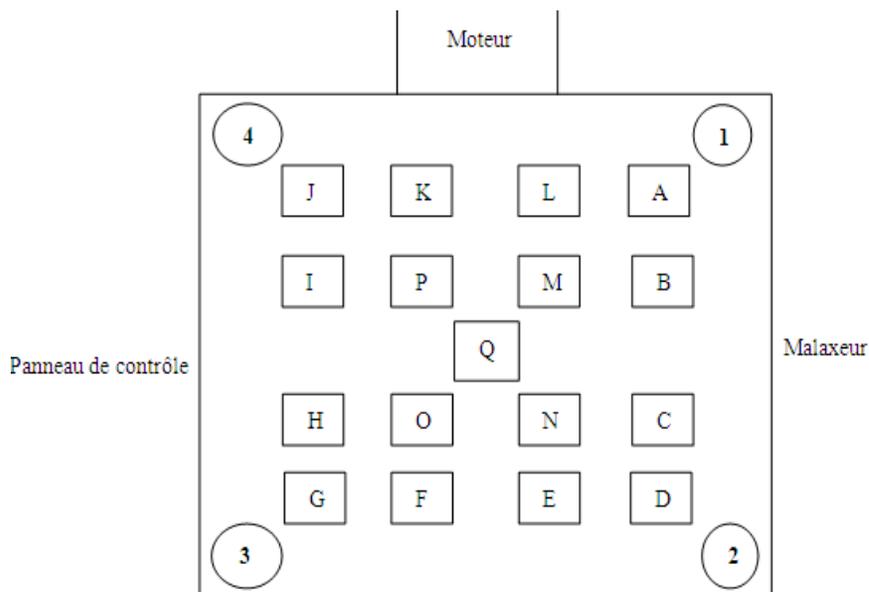


Figure 4.6 : Cartographie de la table de vibration.

Une fois que l'acquisition des données brutes est complétée pour les différents points de mesure vient le tour du traitement des données. Le traitement consiste à faire le calcul de la valeur efficace de l'accélération **RMS** du régime permanent. Ce dernier représente le régime forcé après disparition des termes transitoires provoquée par l'excitation du moteur [106]. La figure 4.8 montre un exemple de deux signaux d'accélérations en fonction du temps où les barres rouges représentent le pas du temps considéré durant les calculs du RMS.

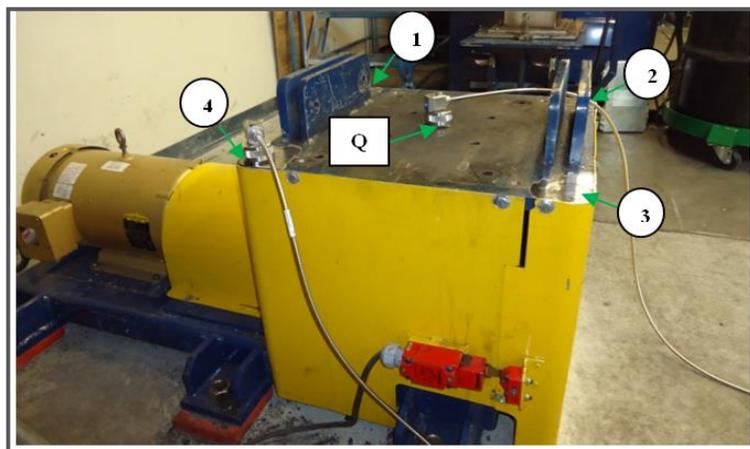


Figure 4.7 : Montage de mesure vibratoire à vide.

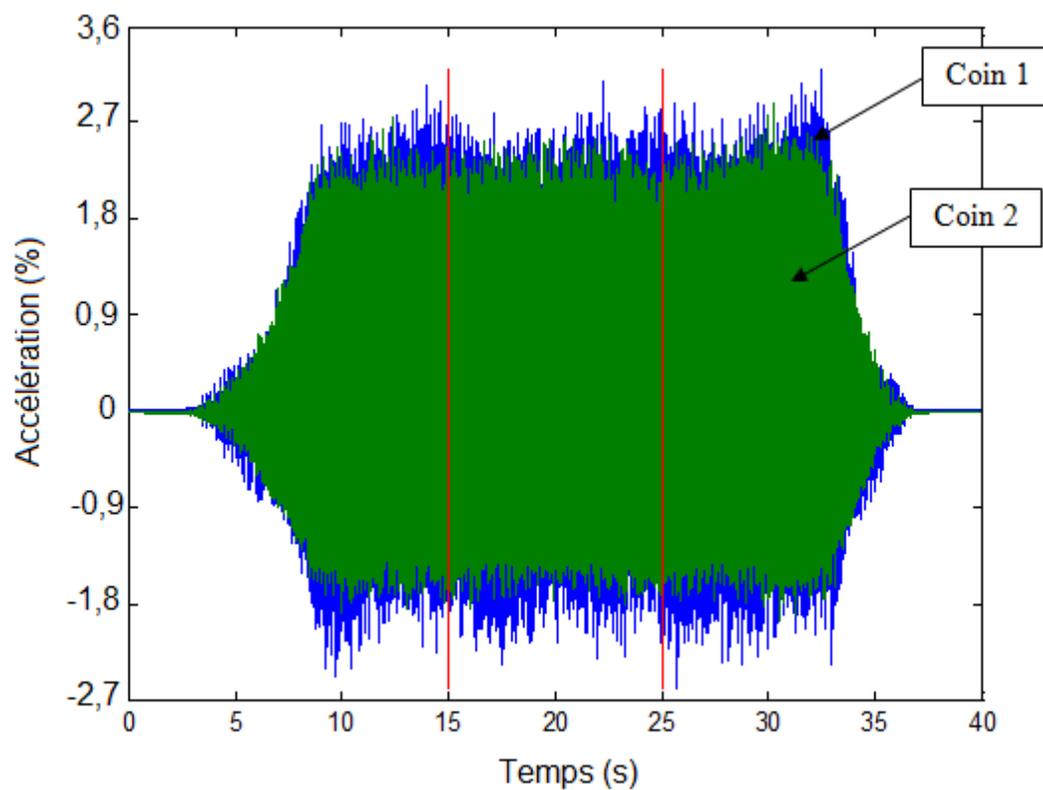


Figure 4.8 : Exemple de calcul du RMS.

Les résultats obtenus durant ces tests sont présentés en perspective 3-D avec Matlab® où l'axe Z représente les accélérations en RMS normalisées par rapport à la

valeur de l'accélération maximale obtenue à la section 4.6. Les axes X et Y représentent les dimensions de la table de vibration. La première cartographie de la table à la figure 4.9 a dévoilé des accélérations élevées sur les coins comparés au milieu. Le coin quatre (4) vibre plus que tous les autres coins. Donc, un diagnostic de l'état de la table de vibration est fait et il s'est avéré que les cages en caoutchouc des guides linéaires ont fondu à cause de la chaleur du préchauffage du moule. C'est la cage du guide linéaire du coin 4 qui a fondu le plus. Un système de refroidissement a été mis en place pour refroidir ces cages en caoutchouc. Par la suite, ces guides linéaires sont remplacés par des nouveaux et une autre cartographie de la table a été réalisée.

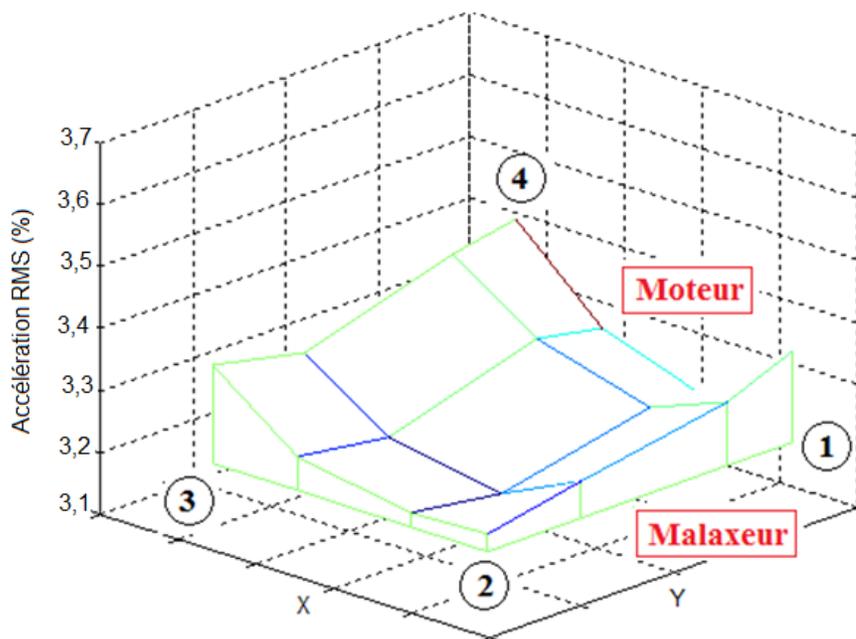


Figure 4.9 : Cartographie 3-D de la table de vibration avec les anciens guides linéaire.

La figure 4.10 présente la cartographie de la table avec les nouveaux guides linéaires. En réalisant ce changement de guides linéaires, un autre type de problème est apparu, qui est la mise à niveau de la table de vibration. Il s'est avéré que l'alignement de l'arbre du

moteur avec la table n'est pas parfaitement perpendiculaire. Ce désalignement a causé plusieurs problèmes de bris au niveau du vibro-compacteur.

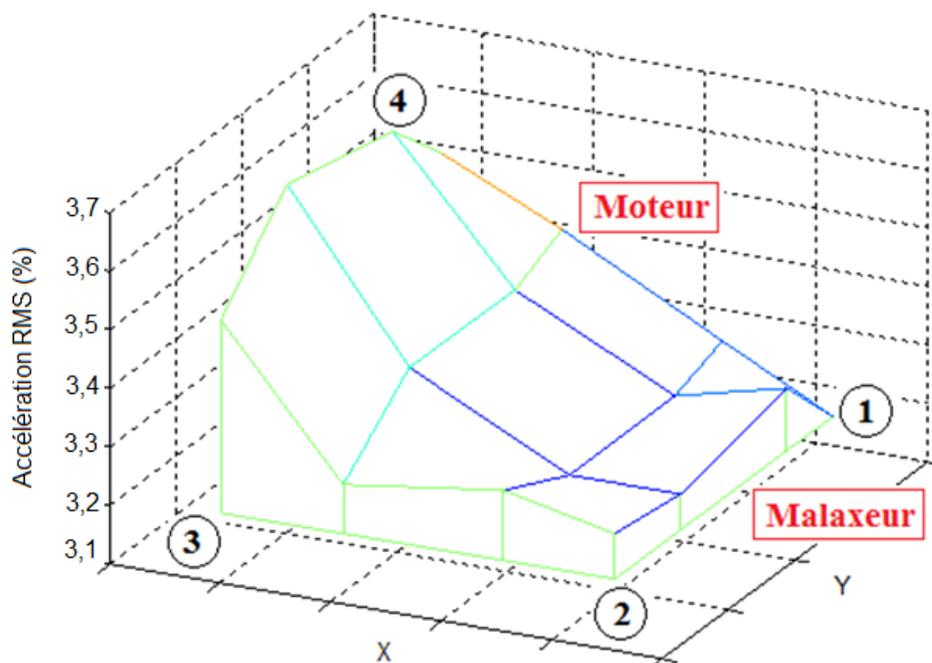


Figure 4.10 : Cartographie 3-D de la table de vibration avec les nouveaux guides linéaire.

Lorsque la principale fonction d'une machine est la vibration, un léger désalignement où un petit jeu dans les roulements se voit amplifier par les forces de vibration et ainsi causer le bris du montage par usure. Actuellement, une mise à niveau ainsi qu'un alignement de la table ont été réalisés et le montage est opérationnel. Au final, ces tests ont conduit à établir une routine de vérification du montage à chaque utilisation par les mesures vibratoires afin d'éviter toute perte de matériel et de prévenir les bris du montage qui peuvent parfois prendre beaucoup de temps pour être réparés.

4.5. Variation des paramètres de vibro-compaction à vide

Cette section représente la méthodologie et les résultats obtenus des tests de mesures vibratoires à vide avec des paramètres vibratoires variables. L'étude s'est basée sur la variation de deux paramètres très déterminants. Ces paramètres représentent la vitesse de vibration et le déplacement total vertical des disques excentriques (amplitude de crête à crête). Cinq déplacements sont testés; 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm et 5 mm et cinq vitesses de vibrations. Le tableau 4.5 présente les cinq vitesses utilisées durant les tests.

Tableau 4.5 : Différentes vitesses testées pour les mesures vibratoires à vide.

Hz	34,36	42,81	51,37	60	68,49
RPM réel	1031	1285	1541	1800	2055
RPM nominal	1000	1250	1500	1750	2000

Les valeurs de vitesses du RPM réel correspondent à celles obtenues expérimentalement et les valeurs du RPM nominal correspondent à celles données par le fournisseur. Cette plage d'opération a été établie selon les études faites au niveau de la littérature et selon les capacités de l'équipement (vibro-compacteur du laboratoire). Les points pris durant les mesures sont ceux présentés à la figure 4.7. Premièrement la figure 4.11 présente les résultats en 3-D de l'accélération en RMS normalisée par rapport à la valeur maximale de l'accélération obtenue à la section 4.6. Cette accélération est tracée en fonction des différents déplacements des excentriques et des vitesses de vibration tracée avec Matlab®. Les analyses montrent qu'avec l'augmentation du déplacement généré par l'excentrique et de la vitesse de vibration, l'accélération du vibro-compacteur augmente aussi.

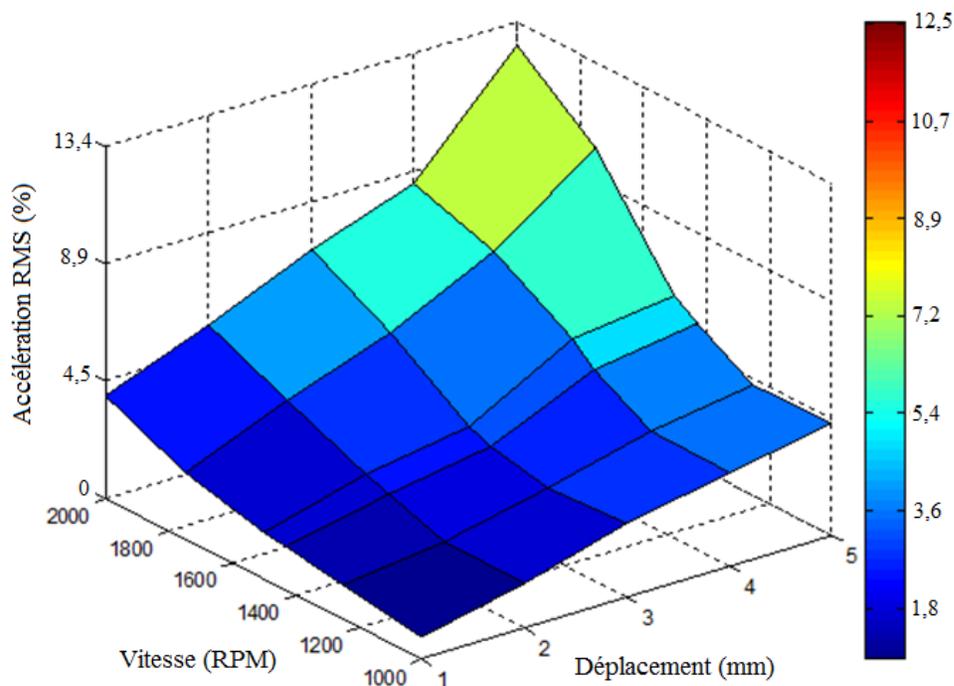


Figure 4.11 : Variation de l'accélération en fonction de la vitesse et du déplacement.

Deuxièmement, le traitement de ces résultats est réalisé d'une autre manière en utilisant Statistica® qui est un logiciel d'analyse de données statistiques. C'est l'analyse de la variance (ANOVA factoriel) qui est utilisée. Cette méthode a pour but de tester la présence de différences significatives ou non entre des moyennes. La différence est significative si la valeur de $p < 0,05$ [107]. Avant de pouvoir utiliser l'approche ANOVA, il faut d'abord vérifier si les données de la population à analyser présentent une distribution normale. La figure 4.12 montre la distribution des accélérations à vide, effectivement c'est une distribution normale puisque les données sont relativement distribuées de façon linéaire autour de la ligne droite rouge (droite de Henry) [103].

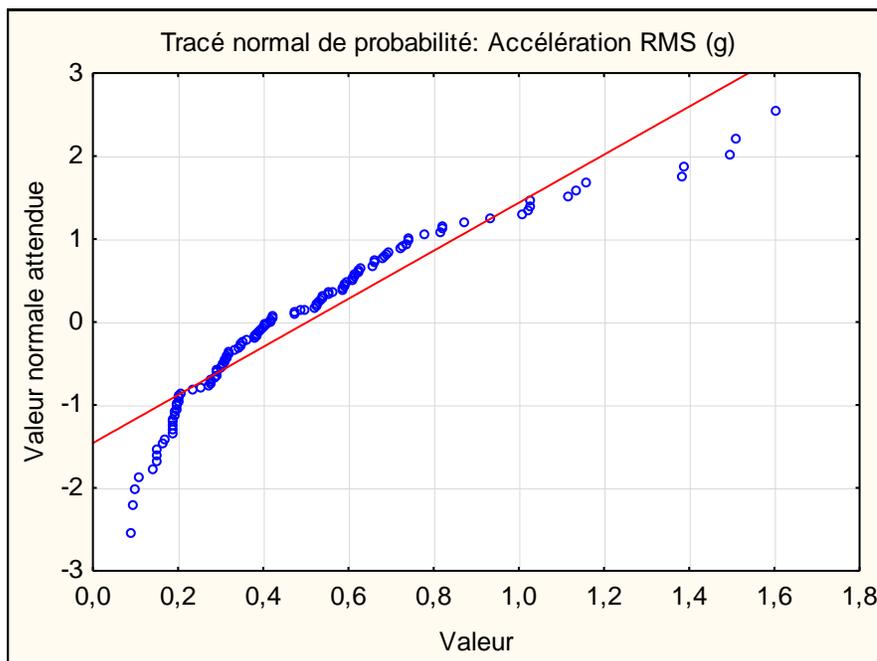


Figure 4.12: Distribution de la population des mesures d'accélération.

Les variations de l'accélération RMS normalisée en fonction du déplacement pour différentes vitesses de vibration obtenue par ANOVA factorielle sont présentées à la figure 4.13. La valeur de p obtenue est bien inférieure à 0,05 pour cette analyse. Donc, la variation de la vitesse ainsi que du déplacement des excentriques démontre une grande influence sur les accélérations de la table vu que la valeur de p obtenue est égale à 0,000. L'intervalle de confiance (confidence interval) donne un intervalle de valeurs autour de la moyenne dans lesquels c'est possible de s'attendre à trouver la vraie moyenne avec un certain niveau de certitude. Donc, dans ce cas, il existe 95 % de chances pour que ce résultat soit juste.

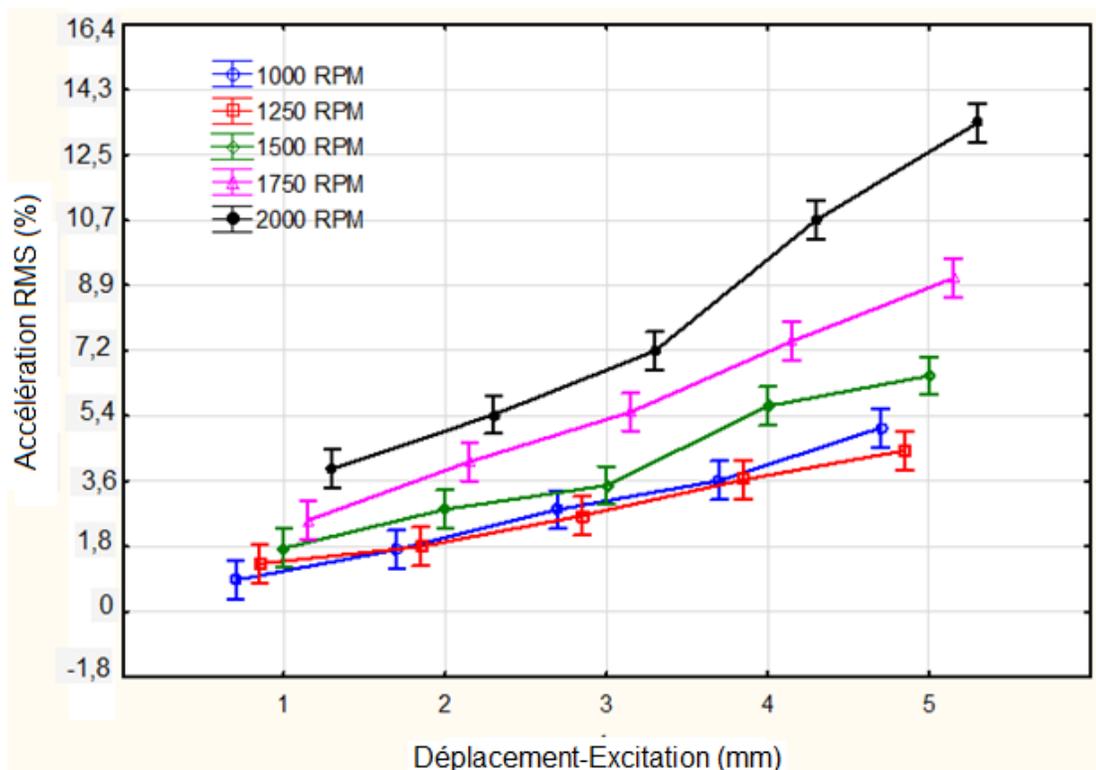


Figure 4.13 : Variation de l'accélération en fonction du déplacement et de la vitesse.

La comparaison entre les accélérations des différentes vitesses montre que pour les vitesses de 1000, 1250 et 1500 RPM, les accélérations n'augmentent pas beaucoup comparées aux vitesses de 1750 et 2000 RPM. À 1750 et à 2000 RPM, la variation de l'accélération devient beaucoup plus prononcée pour tous les déplacements des excentriques testés. Pour ce qui est de l'augmentation de l'accélération pour les différents déplacements, celle-ci présente aussi deux groupes 1 à 3 mm et 4 à 5 mm. L'accélération est plus élevée pour 4 et 5 mm surtout pour les vitesses de 1750 et 2000 RPM. Donc, les vitesses de 1750 et 2000 RPM ainsi que les déplacements de 4 mm et 5 mm sont des paramètres à éviter pour ne pas endommager l'équipement. La figure 4.14 montre la classification de l'importance des paramètres influant sur les accélérations entre la vitesse

et le déplacement. C'est la variation du déplacement qui influe le plus sur les accélérations comparées à la variation de la vitesse dans le cas de cette étude.

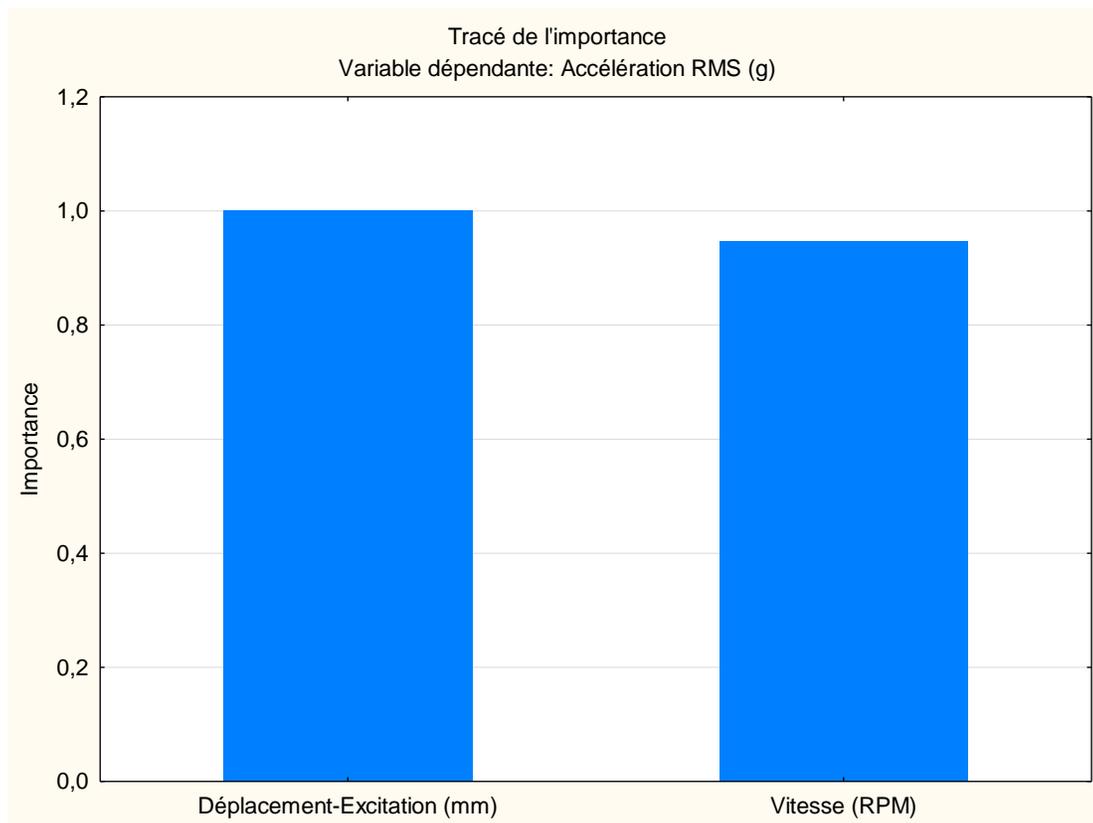


Figure 4.14 : Histogramme de l'importance du déplacement et de la vitesse par rapport à l'accélération.

4.6. Comparaison entre les accélérations expérimentales et analytiques

Dans cette section, une comparaison des résultats des accélérations obtenus expérimentalement pour différentes vitesses et déplacement est présentée avec des calculs analytiques des accélérations pour les mêmes vitesses et déplacements étudiés expérimentalement. Les résultats des accélérations expérimentales qui sont utilisés dans cette étude représentent les accélérations de crête à crête. Contrairement aux sections 4.4 et 4.5 ou c'est les accélérations en RMS qui sont utilisées.

- **Calcul analytique**

Afin de pouvoir calculer une approximation de l'accélération analytiquement, les équations qui représentent la force d'excitation du système sont utilisées.

$$F(t) = \bar{F}_0 \sin wt \quad (4.1)$$

avec:

$$\bar{F}_0 = mew^2 \quad (4.2)$$

$F(t)$: force de vibration.

m : masse du balourd (kg).

e : excentricité (m).

w : vitesse de vibration (rad/s).

La masse du balourd est prise comme étant constante, donc l'accélération du système est égale à ew^2 . Les vitesses qui sont prises en considération lors des calculs sont présentées au tableau 4.6. Les déplacements utilisés sont : 1, 2, 3, 4 et 5 mm.

Tableau 4.6 : Vitesses de vibration.

RPM	1000	1250	1500	1750	2000
rad/s	104,72	130,90	157,08	183,26	209,44

- **Mesures expérimentales**

Dans cette section, des mesures d'accélération à vide crête à crête du vibro-compacteur du laboratoire ont été prises pour les mêmes vitesses et déplacements que pour le cas analytique. Les mesures ont été prises sur les coins de la table de vibration à vide en utilisant deux accéléromètres. Puisque les résultats du calcul analytique donnent les accélérations maximales, donc le calcul du RMS n'a pas été fait pour ces résultats expérimentaux d'accélération.

- **Comparaison des résultats**

Les résultats normalisés des accélérations analytiques et expérimentales obtenues pour les différentes vitesses et les différents déplacements sont présentées dans le tableau 4.7. Avec l'augmentation de la vitesse et du déplacement, les accélérations augmentent aussi. L'écart type entre les accélérations obtenues montre qu'il existe une certaine erreur tout en augmentant les vitesses et les déplacements, cependant cela demeure quand même une très bonne approximation. L'erreur est due au fait que le calcul analytique est juste une approximation de l'accélération réelle. Cette accélération est influencée par différents paramètres qui ne sont pas inclus dans les calculs comme entre autres : masse de la table, rigidité et amortissement du montage, usure des roulements.

Tableau 4.7 : Résultats des accélérations en % analytiques et expérimentales.

Résultats		1000 RPM	1250 RPM	1500 RPM	1750 RPM	2000 RPM
1 mm	Analytique	5,01	7,78	11,27	15,30	20,04
	Expérimentale	5,01	8,32	10,55	14,94	24,15
	Écart type	0,00	0,38	0,51	0,25	2,91
2 mm	Analytique	10,02	15,65	22,54	30,59	39,98
	Expérimentale	10,11	10,11	15,38	21,65	26,92
	Écart type	0,06	3,92	5,06	6,32	9,23
3 mm	Analytique	15,03	23,43	33,72	45,97	60,02
	Expérimentale	22,36	12,88	14,31	27,19	31,66
	Écart type	5,19	7,46	13,72	13,28	20,05
4 mm	Analytique	20,04	31,22	44,99	61,27	79,96
	Expérimentale	21,29	14,31	31,57	32,56	52,59
	Écart type	0,89	11,95	9,49	20,30	19,35
5 mm	Analytique	24,96	39,09	56,26	76,57	100,00
	Expérimentale	36,94	23,61	31,31	52,15	65,12
	Écart type	8,48	10,94	17,65	17,27	24,67

- **Représentation graphique des accélérations**

Les graphes présentés à la figure 4.15 et à la figure 4.16 montrent respectivement les variations des accélérations analytiques et expérimentales. Avec l'augmentation de la vitesse et du déplacement des excentriques, l'accélération a augmentée dans tous les cas que ce soit analytique ou expérimental. Cependant dans le cas des mesures expérimentales, les résultats obtenus pour les déplacements de 1 à 3 mm sont plus rapprochés entre eux comparé aux résultats analytiques. Les accélérations expérimentales pour les cas des déplacements 4 et 5 mm ont augmentées avec un plus grand pas comparé aux déplacements 1, 2 et 3 mm. Cette différence entre la variation des résultats d'accélération expérimentale

et analytique s'explique par la capacité de l'équipement. Dans la théorie, en augmentant la vitesse et le déplacement, les accélérations augmentent avec la même cadence. Par contre, au niveau de l'expérimentation, c'est clair que ce n'est pas le cas. L'augmentation de l'accélération enregistrée est limitée par la capacité de l'équipement. Les déplacements 4 et 5 mm de même que les vitesses 1750 et 2000 RPM ne sont pas recommandés pour le fonctionnement cet équipement.

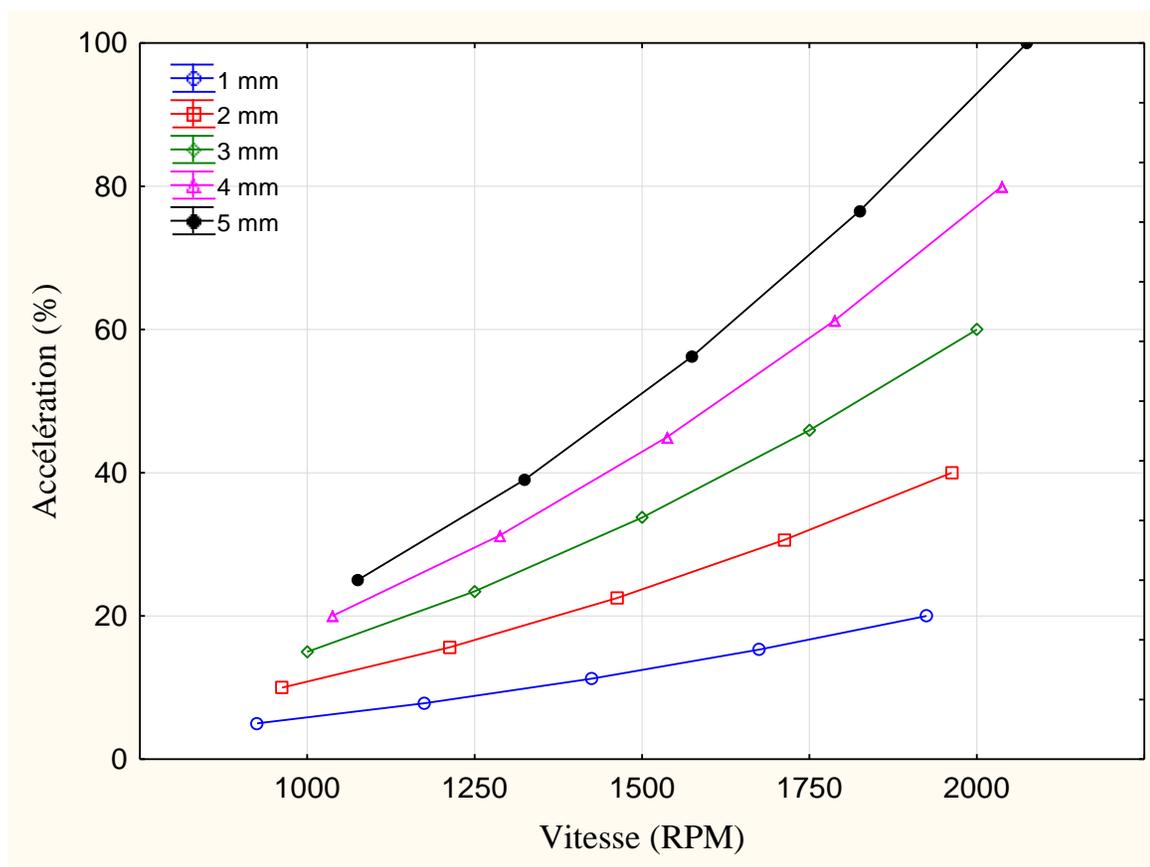


Figure 4.15 : Variation de l'accélération analytiquement.

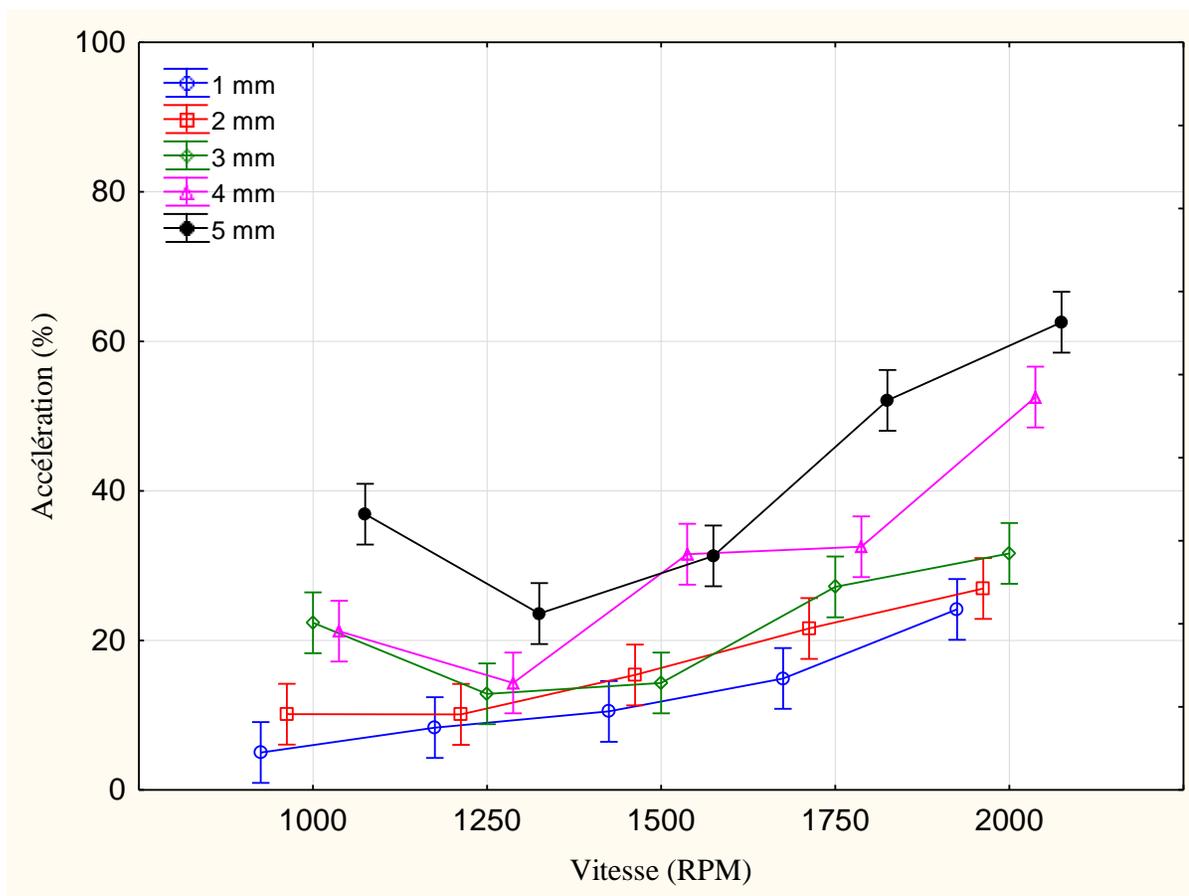


Figure 4.16 : Variation de l'accélération expérimentalement.

4.7. Conclusions

Afin de pouvoir trouver la charge morte à appliquer sur une anode du laboratoire, une équivalence de la charge morte appliquée sur une anode industrielle par rapport à celle du laboratoire est réalisée. Les paramètres de conception du vibro-compacteur du laboratoire sont établis en s'inspirant de la revue de littérature existante sur les vibro-compacteurs industriels et du laboratoire ainsi que des données confidentielles fournies par le partenaire industriel et du travail d'équipe du groupe de la chaire de recherche UQAC/AAI.

Les vitesses d'opération, les pressions de charge ainsi que les dimensions du moule ont été ajustées afin d'opérer dans les bonnes conditions. Toutes les calibrations faites au niveau du vibro-compacteur du laboratoire sont intégrées à la procédure standard de fabrication des anodes en laboratoire. Ces calibrations ont permis l'amélioration de la qualité des anodes produites en laboratoire.

Les cartographies faites au niveau de la table de vibration ont permis de détecter des défauts de fabrication ainsi que des problèmes d'usure. Cette analyse a conduit à faire des mesures de vibrations en continu : avant, durant et après la fabrication des anodes. Les résultats des mesures sont tout le temps comparés aux données de mesures initiales. Donc, si les valeurs d'accélération à vide commencent à augmenter, cela signifie la présence de problèmes au niveau du montage. À ce moment, un diagnostic ainsi qu'un changement de pièces si nécessaire s'imposent avant de recommencer à fabriquer des anodes.

Les mesures vibratoires à vide ont permis d'établir les plages admissibles d'opération de vitesse et de déplacement pour le vibro-compacteur du laboratoire. Cette étude a permis aussi de diminuer les plages des paramètres à étudier dans le cas de la fabrication des anodes en laboratoire avec des paramètres de vibro-compaction variables (présentée au chapitre 5).

CHAPITRE 5

ÉTUDE VIBRATOIRE ET CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS

MÉCANIQUES : ANODES UQAC

5.1. Introduction

Des anodes du laboratoire ayant des paramètres de vibro-compactions variables sont fabriquées dans ce projet afin de pouvoir voir l'effet de la variation des différents paramètres de vibro-compaction sur la qualité des anodes crues. Premièrement, la méthodologie, les procédures des essais de fabrication des anodes en laboratoire et la calibration des anodes du laboratoire sont présentées. Par la suite, les résultats et la discussion des différents tests physiques et mécaniques réalisés sur ces anodes du laboratoire sont présentés.

5.2. Méthodologie et procédure des essais

Cette section comprend premièrement les calibrations du vibro-compacteur du laboratoire avec de la pâte d'anode. Deuxièmement, un résumé des étapes de fabrication des anodes en laboratoire est présenté. Par la suite, vient le tour du plan établi pour la fabrication des anodes en laboratoire avec des paramètres variables du vibro-compacteurs.

5.2.1. Calibration du vibro-compacteur avec anodes

Avant d'arriver à fabriquer de bonnes anodes en laboratoire, plusieurs tests de calibration sont effectués. Il faut ajuster tous les paramètres des différents procédés de fabrication des anodes. La figure 5.1 présente une nette amélioration de la fabrication des anodes en laboratoire. La structure du dernier échantillon N° 6 du laboratoire s'apparente à l'échantillon industriel.

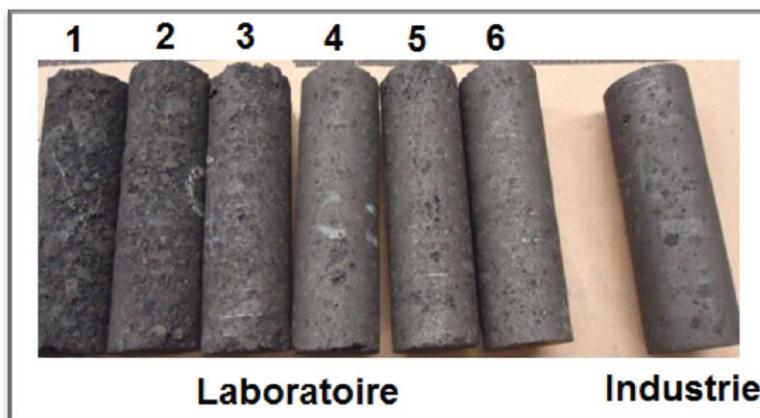


Figure 5.1 : Amélioration de la fabrication des anodes en laboratoire.

Dans la section 4.5, des calibrations du vibro-compacteur à vide sont réalisées pour différentes amplitudes et vitesses de vibration afin d'obtenir les différentes plages d'opération admissibles. Maintenant, dans cette section, les calibrations du vibro-compacteur du laboratoire sont reprises; cependant, cette fois-ci c'est avec de la pâte d'anode. La quantité de pâte utilisée est la même que la masse d'une anode normale. Pour cette calibration, ce sont les vitesses de vibration qui ont été variées de 34,36 Hz à 60 Hz (1000 à 1750 RPM). Durant tous les essais, le déplacement des excentriques est gardé le

même. Durant chaque essai, les mesures des accélérations de la table de vibration sont prises pendant le régime transitoire. Les résultats des accélérations RMS sont normalisés en % par rapport à l'accélération maximale obtenue à la section 4.6. Ces accélérations de la pâte d'anode sont montrées à la figure 5.2 en fonction des différentes vitesses de vibration. Avec l'augmentation de la vitesse de vibration, l'accélération augmente aussi. Ce résultat valide bien la partie des mesures vibratoires à vide présentée à la section 4.5 dans le cas des variations des vitesses de vibration à vide.

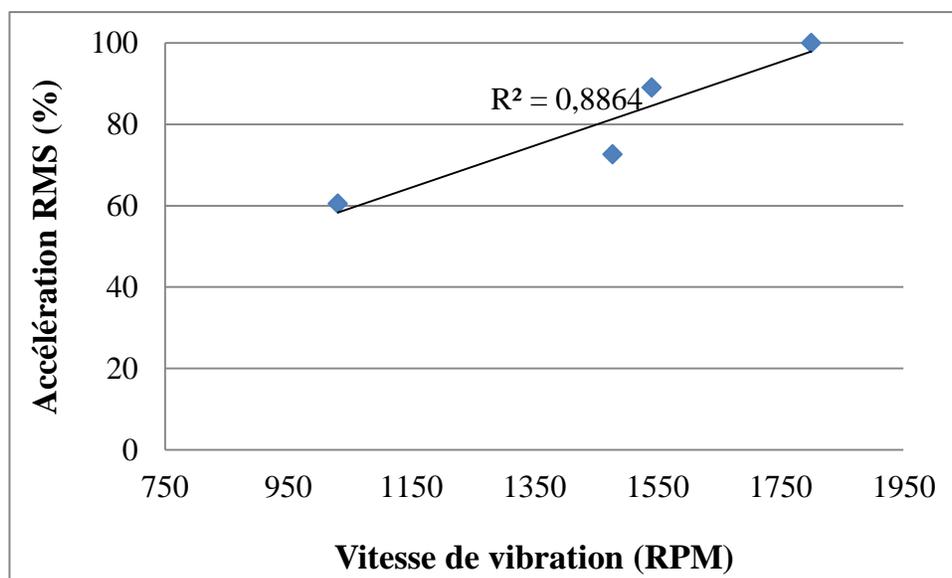


Figure 5.2 : Variation de l'accélération de la pâte en fonction de la vitesse.

5.2.2. Procédures de fabrication des anodes en laboratoire

Durant cette section, les étapes principales suivies durant la fabrication des anodes en laboratoire sont présentées. Premièrement, il faut préparer la recette de la pâte d'anode constituée de brai, de coke frais, de mégot et de rejets crus et cuits. La recette d'anode qu'on a utilisée au laboratoire est la même qu'utilise le partenaire industriel pour la

fabrication des anodes industrielles. Afin d'avoir les bons pourcentages des différents agrégats de cette recette, le tamiseur illustré à la figure 5.3 est employé afin d'obtenir les différentes fractions souhaitées. Les différentes fractions avec lesquelles il faut travailler sont les particules grossières, moyennes et fines ainsi que les produits broyés et les poussières. Par conséquent, pour préparer la recette d'une anode, il faut tamiser les bonnes quantités de coke frais, mégots, rejets crus et cuits pour les différentes fractions. Par la suite, il faut bien mélanger le tout. Puis, il faut peser la bonne quantité de brai à utiliser selon le pourcentage de brai de la recette suivie. Une fois que ces matières premières sont préparées vient le tour de l'étape du préchauffage.



Figure 5.3 : Équipement pour le tamisage.

Le préchauffage du coke et du brai se fait à part. Une fois que le temps de préchauffage désiré est atteint avec des températures prédéfinies, c'est à l'étape du

malaxage qui arrive. La figure 5.4 présente le malaxeur utilisé pour la préparation des anodes en laboratoire.



Figure 5.4 : Malaxeur du laboratoire.

Pour ce qui est des paramètres du malaxeur, la température d'opération, la vitesse de rotation de la cuve et des pales ainsi que le temps de malaxage sont ajustés au début du procédé. Une fois que le procédé de malaxage est terminé, la pâte d'anode est transférée dans le moule du vibro-compacteur déjà préchauffé. Ensuite, c'est le tour du procédé de vibro-compaction. Durant cette étape, des mesures d'accélération de la table avec la tige durant tout le cycle de vibro-compaction sont prises à chaque fois qu'une anode est fabriquée. Un exemple des mesures d'accélération est présenté à la figure 5.5.

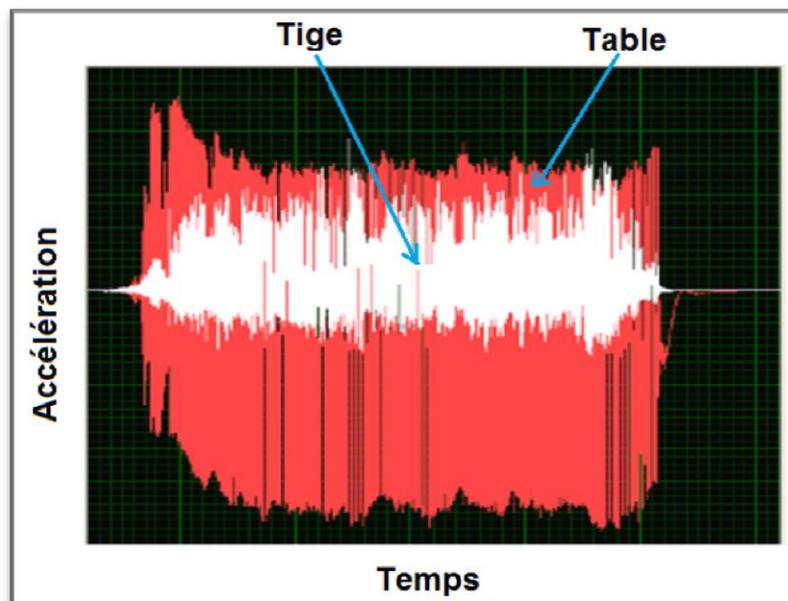


Figure 5.5 : Accélérations superposées de la table et de la tige.

L'accélération de la tige à la figure 5.5 est plus faible comparée à l'accélération de la table, ce qui est normal. Des mesures d'accélération de la table à vide sont aussi prises avant la fabrication d'une anode pour s'assurer que le signal de vibration est bon. Une fois que le procédé de vibro-compaction est terminé, l'anode est sortie du moule et refroidit à l'air libre. Dans le cas de ce projet de recherche, la recette d'anode utilisée, les températures et le temps de préchauffage, les paramètres du procédé de malaxage sont tous maintenus les mêmes pour toutes les anodes fabriquées. C'est au niveau du procédé de vibro-compaction qu'on a changé les différents paramètres d'opération. Les paramètres qui ont été variés pour ce procédé de vibro-compaction sont : le temps de vibration, la vitesse de vibration, le déplacement des excentriques, la charge morte et la pression de charge.

5.2.3. Plan de fabrication des anodes en laboratoire

Le plan de fabrication des anodes en laboratoire avec des paramètres de vibro-compaction variables est présenté dans cette partie. Cette étude a permis de valider la partie des tests à vide présentée dans la section 4.5. Elle a aussi permis de voir l'influence de la variation des paramètres de vibro-compaction sur les propriétés physiques et mécaniques des anodes et de trouver les plages d'opération du vibro-compacteur. Cette section est très critique, car elle dépend de la capacité de l'équipement.

Dans les essais, la même recette de pâte est gardée et les paramètres de vibro-compactions sont variés. Les paramètres qui sont étudiés sont présentés au tableau 5.1. Ce sont des variations de la vitesse, du déplacement, du temps de vibration, de la charge morte ainsi que de la pression de charge en fonction de l'accélération. Chaque paramètre est changé indépendamment des uns et des autres.

L'anode qui est encadrée en vert dans le plan du tableau 5.1 représente l'anode standard dans le cas de cette étude. Les cas des anodes encadrées en orange représentent les anodes qui ne sont pas fabriquées pour des raisons qui sont expliquées ci-dessous. Premièrement, les déplacements ont été variés. L'anode N° 3 avec le déplacement $D3$ n'a pas été fabriquée, car le déplacement $D2$ est le maximum que peut supporter cet équipement. Deuxièmement, la vitesse de vibration a été variée de plus ou moins la vitesse standard $V2$. Troisièmement, le temps de vibration a été varié de plus ou moins le temps standard. Quatrièmement, la charge morte a été variée, mais cette fois toujours en la diminuant par rapport à la charge standard $C2$. Dès le départ, c'était connu que ce n'était

pas possible d'aller plus en charge (indications du fabricant). Au moment de la fabrication de l'anode N° 8, la densité obtenue était plus petite comparée à l'anode standard N° 1, donc l'anode N° 9 a été annulée. Pour ce qui est du cinquième paramètre, c'est la pression de charge qui a été variée de plus ou moins la pression standard $P2$. Cependant, en essayant de fabriquer l'anode N° 11, avec une pression de charge élevée $P3$, le cycle de vibro-compaction a été écourté. Le vibro-compacteur s'est arrêté au bout de quelques secondes après le démarrage avec un message d'erreur; c'est pourquoi l'anode a été rejetée. Après des vérifications ont été faites pour savoir si le vibro-compacteur était encore fonctionnel en remettant les conditions standards d'opération du vibro-compacteur de laboratoire, il a fonctionné parfaitement.

Tableau 5.1: Plan préliminaire de fabrication des anodes en laboratoire.

Anodes	Déplacement	Vitesse	Temps	Charge	Pression
1	$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
2	$D1 < D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
3	$D3 > D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
4	$D2$	$V1 < V2$	$t2$	$C2$	$P2$
5	$D2$	$V3 > V2$	$t2$	$C2$	$P2$
6	$D2$	$V2$	$t1 < t2$	$C2$	$P2$
7	$D2$	$V2$	$t3 > t2$	$C2$	$P2$
8	$D2$	$V2$	$t2$	$C1 < C2$	$P2$
9	$D2$	$V2$	$t2$	$C3 \ll C2$	$P2$
10	$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P1 < P2$
11	$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P3 > P2$

Le tableau 5.2 représente le plan final des anodes qui ont été fabriquées au laboratoire durant cette étude. Les variations en pourcentage des différents paramètres de vibro-compaction sont présentées au tableau 5.3.

Tableau 5.2 : Plan de fabrication des anodes en laboratoire.

Anodes	Déplacement	Vitesse	Temps	Charge	Pression
1	$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
2	$D1 < D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
3	$D2$	$V1 < V2$	$t2$	$C2$	$P2$
4	$D2$	$V3 > V2$	$t2$	$C2$	$P2$
5	$D2$	$V2$	$t1 < t2$	$C2$	$P2$
6	$D2$	$V2$	$t3 > t2$	$C2$	$P2$
7	$D2$	$V2$	$t2$	$C1 < C2$	$P2$
8	$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P1 < P2$

Tableau 5.3 : Pourcentage des variations des paramètres de vibro-compaction.

Déplacement (mm)	Vitesse (RPM)	Temps (s)	Charge (kg)	Pression (psi)
$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
$D1 = D2 - 1 \text{ mm}$	$V1 = V2 - 190 \text{ RPM}$	$t1 = t2 - 10 \text{ s}$	$C1 = C2 - 17 \text{ kg}$	$P1 = P2 - 10 \text{ psi}$
	$V3 = V2 + 85 \text{ RPM}$	$t3 = t2 + 15 \text{ s}$		

5.2.4. Procédures de caractérisation des anodes du laboratoire

La série d'anodes fabriquée au laboratoire est présentée à la figure 5.6. Ce sont des anodes d'environ 10 kg. Un plan de carottage a été mis en place afin de pouvoir caractériser les échantillons de ces différentes anodes.



Figure 5.6 : Série d'anodes du laboratoire.

La figure 5.7 montre le plan de carottage standardisé pour le laboratoire qui comprend la prise de quatre échantillons par anode. Pour cela, il faut s'assurer toujours de prendre les quatre échantillons aux mêmes positions au niveau de chaque anode à l'aide d'un gabarit. Dans ce cas d'études, un total de trente-deux échantillons pour les huit anodes carottées a été mesuré. La figure 5.8 présente un exemple d'une anode carottée avec une série d'échantillons provenant de différentes anodes carottées.

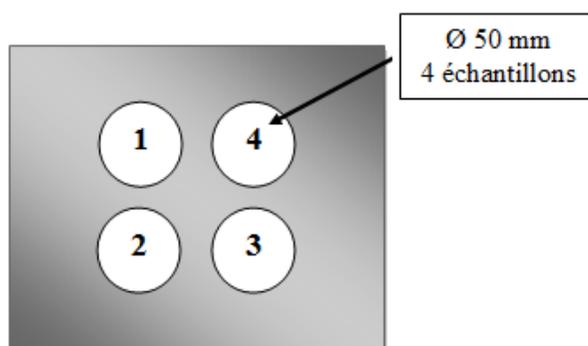


Figure 5.7 : Plan de carottage des anodes en laboratoire.



Figure 5.8 : Exemple d'une anode carottée et série d'échantillons.

Les longueurs des échantillons sont de 130 mm. Il faut les sécher d'abord avant de mesurer leur densité apparente ainsi que leur résistivité électrique puisque le carottage se fait à l'eau. Pour ce qui est de ces deux dernières mesures, les procédures suivies sont celles présentées aux sections 3.2.5 et 3.2.6. Pour ce qui est des tests mécaniques, ce sont les procédures des sections 3.2.3 et 3.2.4 qui ont été suivies. Le tableau 5.4 présente un exemple de la correspondance des différents tests avec les échantillons dans le cas d'une anode. C'est la même chose pour toutes les autres anodes.

Tableau 5.4 : Plan des tests physiques et mécaniques d'une anode du laboratoire.

Échantillons	Densité apparente	Résistivité électrique	Résistance en flexion	Résistance en compression	Module de Young
1	✓	✓		✓	✓
2	✓	✓		✓	✓
3	✓	✓	✓		
4	✓	✓	✓		

5.3. Résultats et discussions

Cette partie comporte les résultats et discussions des caractérisations physiques et mécaniques effectuées sur les anodes crues fabriquées en laboratoire. Premièrement, ce sont les résultats des caractérisations d'anodes formées avec des déplacements d'excentriques différents. Par la suite, ce sont les résultats des anodes fabriquées avec différentes vitesses de vibration. En troisième lieu, les résultats des anodes formées au temps de vibration variable sont présentés. Par la suite, c'est le tour des résultats des variations de la charge morte. Cinquièmement, ce sont les résultats des anodes formées à différentes pressions de charge. Donc, un seul paramètre est varié à la fois. Les températures de préchauffage des matières premières et du moule sont maintenues, les mêmes durant tous les essais. Tous les résultats sont normalisés et présentés en pourcentage pour les anodes du laboratoire. Les valeurs maximales utilisées durant la normalisation proviennent des valeurs maximales des résistances en flexion, en compression, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité électrique obtenues durant les tests de la série des anodes du laboratoire.

5.3.1. Variation du déplacement-Excitation externe

Les comparaisons des résultats des propriétés physiques et mécaniques des deux anodes crues du laboratoire au tableau 5.5 fabriquées en fonction des déplacements $D1$ et $D2$ sont présentées dans cette section. Le déplacement $D2$ indique le déplacement de l'excentrique standard utilisé pour la fabrication des anodes du laboratoire. Tous les autres paramètres sont maintenus constants. Donc, au total huit échantillons ont été testés pour ce

cas d'étude. Le tableau 5.6 présente le nombre de tests effectués pour chaque échantillon d'une anode selon le plan de la figure 5.7.

Tableau 5.5 : Anodes du laboratoire avec différents déplacements des excentriques.

Anodes	Déplacement	Vitesse	Temps	Charge	Pression
1	$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
2	$D1 < D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$

Tableau 5.6 : Différents échantillons testés – Déplacement variable.

Tests	Anode 1	Anode 2
	Échantillons testés	
Résistance en flexion	3	3 et 4
Résistance en compression	1 et 2	1 et 2
Module de Young	1 et 2	1 et 2
Densité apparente	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4
Résistivité électrique	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4

Les résultats des caractérisations physiques et mécaniques obtenus en variant le déplacement sont présentés au tableau 5.7. Les figures suivantes : figure 5.9, figure 5.10, figure 5.11, figure 5.12 et figure 5.13 montrent respectivement les résultats des résistances en flexion, en compression, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité électrique pour les déplacements testés.

Tableau 5.7 : Propriétés physiques et mécaniques – Déplacement variable.

Anode	Calculs	Résistance en flexion (%)	Résistance en compression (%)	Module de Young (%)	Densité apparente (%)	Résistivité électrique (%)
1	Moyenne	85,08	91,46	92,89	98,67	87,38
	Écart type		10,92	6,02	0,42	8,67
2	Moyenne	77,14	79,34	85,93	95,79	90,11
	Écart type	2,38	5,35	0,45	0,15	2,80

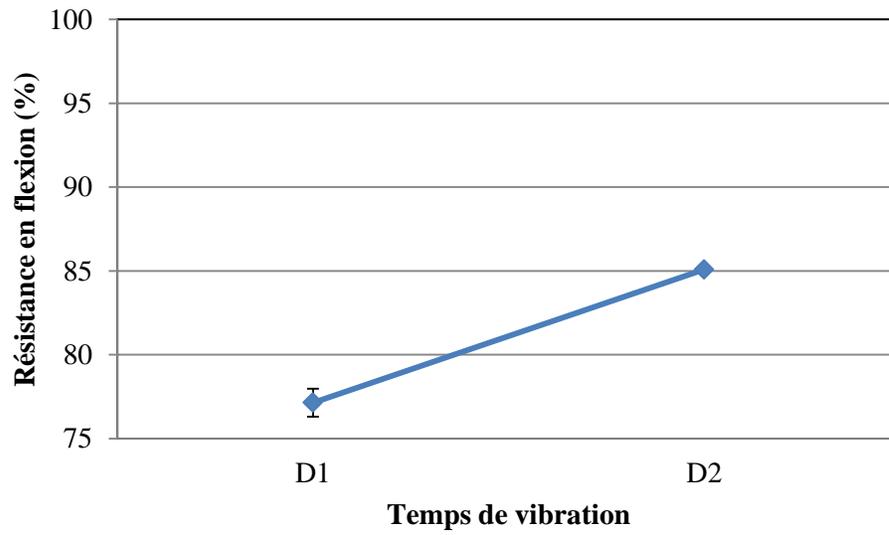


Figure 5.9 : Variation de la résistance en flexion en fonction du déplacement.

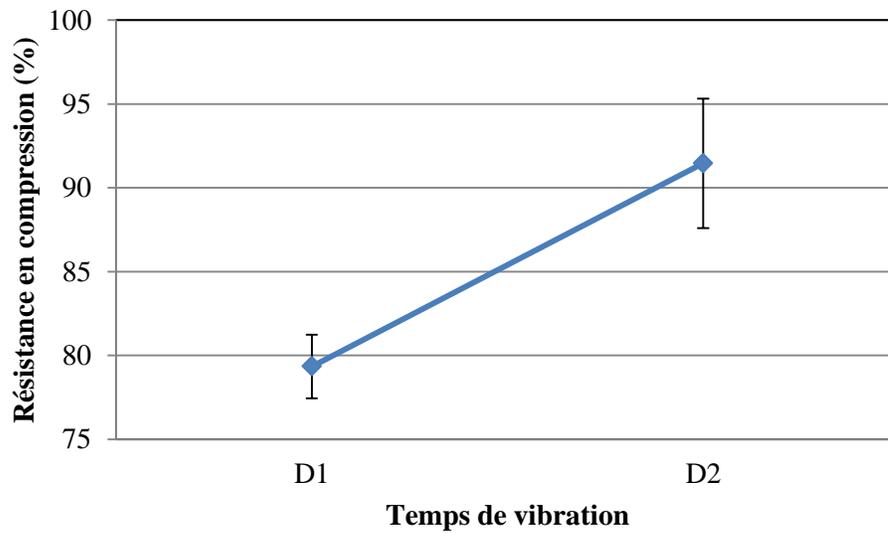


Figure 5.10 : Variation de la résistance en compression en fonction du déplacement.

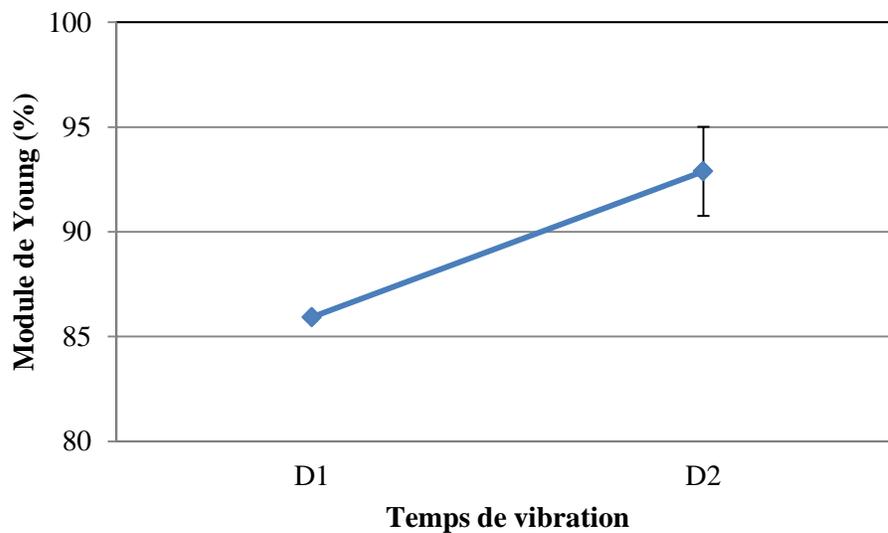


Figure 5.11 : Variation du module de Young en fonction du déplacement.

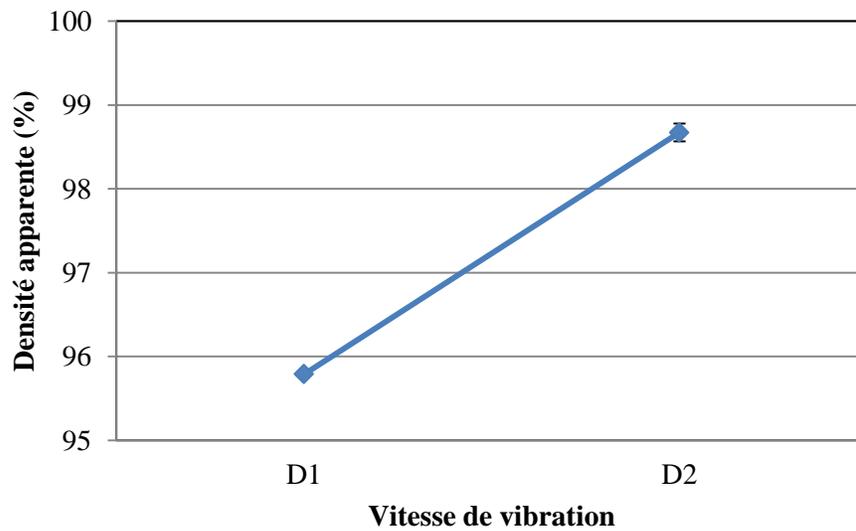


Figure 5.12 : Variation de la densité apparente en fonction du déplacement.

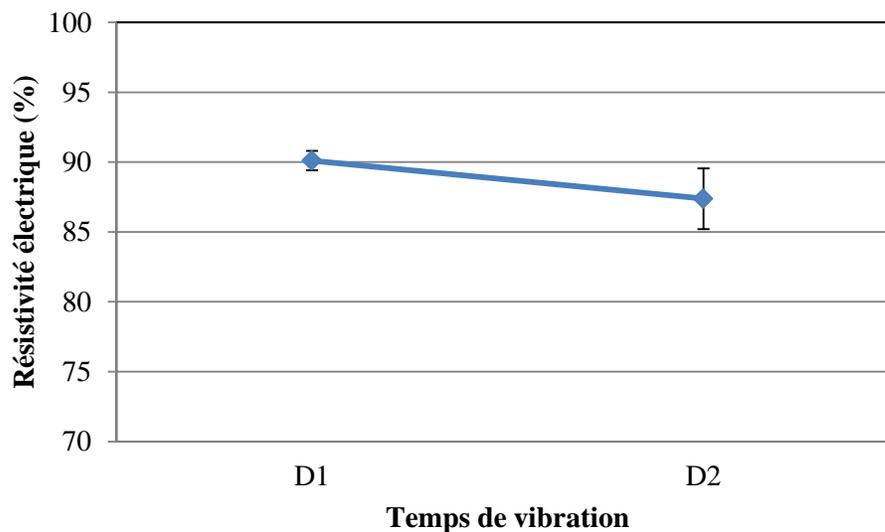


Figure 5.13 : Variation de la résistivité électrique en fonction du déplacement.

En diminuant le déplacement de l'excentrique de 1 mm par rapport au déplacement standard *D2*, les résistances en flexion, en compression, le module de Young et la densité apparente ont baissé. La résistivité électrique a augmenté en utilisant un déplacement de l'excentrique *D1* inférieur au déplacement standard du laboratoire *D2*. Ce résultat reflète bien ce qui a été trouvé dans la littérature [75] de la figure 2.18. Rappelant que le déplacement de l'excentrique pour ce vibro-compacteur représente le balourd dans le cas des vibro-compacteurs industriels. Donc, en diminuant les déplacements, la force de vibration diminue. C'est pour cette raison que toutes les propriétés ont baissé sauf la résistivité électrique qui a augmenté, ce qui est normal. En général, tant que la force de vibration augmente, les propriétés de l'anode augmentent. Cependant, cette augmentation est limitée par l'équipement, mais aussi par la qualité de l'anode cuite. Pour le cas de ce vibro-compacteur du laboratoire, c'est le déplacement *D2* qui représente la limite que peut supporter le montage. Pour ce qui est de la qualité, une densité élevée ne signifie pas

toujours une bonne anode. Après un certain point de densité élevée, les fissures commencent à se former, ce qui augmente la résistivité électrique. La détection de ces fissures n'est pas facile dans les anodes crues, car leurs résistivités sont déjà très élevées et les fissures pourraient être petites. Mais ces fissures peuvent s'élargir pendant la cuisson des anodes formant ainsi des anodes cuites de mauvaise qualité.

5.3.2. Variation de la vitesse de vibration

Les comparaisons des résultats des propriétés physiques et mécaniques des trois anodes crues du laboratoire au tableau 5.8 fabriquées en fonction des vitesses $V1$, $V2$ et $V3$ sont présentées dans cette section. La vitesse $V2$ indique la vitesse standard utilisée pour la fabrication des anodes du laboratoire. Tous les autres paramètres sont maintenus constants. Donc, au total douze échantillons ont été testés pour ce cas d'étude. Le tableau 5.9 présente le nombre de tests effectués pour chaque échantillon d'une anode selon le plan de la figure 5.7.

Tableau 5.8 : Anodes du laboratoire fabriquées avec des vitesses variables.

Anodes	Déplacement	Vitesse	Temps	Charge	Pression
1	$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
3	$D2$	$V1 < V2$	$t2$	$C2$	$P2$
4	$D2$	$V3 > V2$	$t2$	$C2$	$P2$

Les résultats des caractérisations physiques et mécaniques obtenus en variant la vitesse sont présentés au tableau 5.10. Les figures suivantes : figure 5.14, figure 5.15, figure 5.16, figure 5.17 et figure 5.18 montrent respectivement les résultats des résistances

en flexion, en compression, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité électrique pour les vitesses de vibration testées.

Tableau 5.9 : Différents échantillons testés – Vitesse variable.

Tests	Anode 1	Anode 3	Anode 4
	Échantillons testés		
Résistance en flexion	3	3 et 4	3 et 4
Résistance en compression	1 et 2	1 et 2	1 et 2
Module de Young	1 et 2	1 et 2	1 et 2
Densité apparente	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4
Résistivité électrique	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4

Tableau 5.10 : Propriétés physiques et mécaniques –Vitesse variable.

Anode	Calculs	Résistance en flexion (%)	Résistance en compression (%)	Module de Young (%)	Densité apparente (%)	Résistivité électrique (%)
1	Moyenne	85,08	91,46	92,89	98,67	87,38
	Écart type		10,92	6,02	0,42	8,67
3	Moyenne	85,43	88,41	95,31	98,19	83,93
	Écart type	5,72	6,11	5,32	0,20	3,70
4	Moyenne	89,35	92,48	94,38	99,77	72,80
	Écart type	1,91	5,08	7,95	0,16	2,84

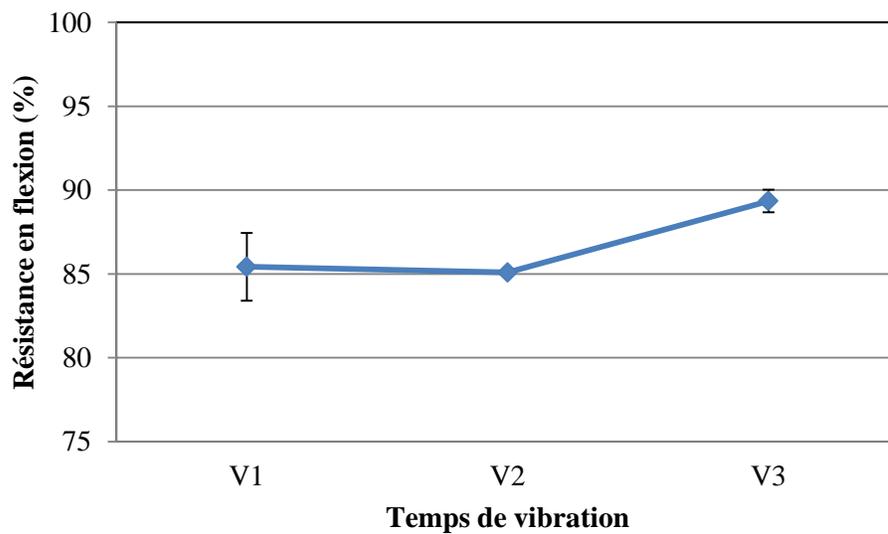


Figure 5.14 : Variation de la résistance en flexion en fonction de la vitesse de vibration.

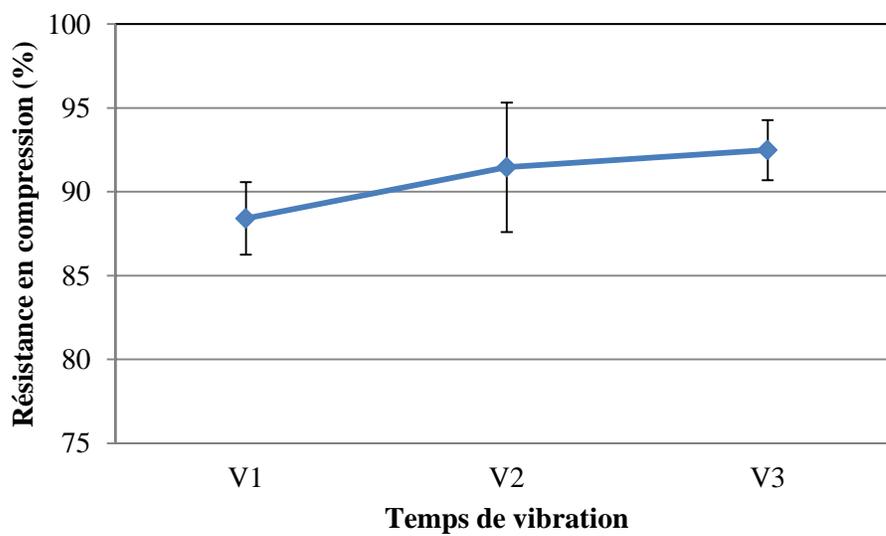


Figure 5.15 : Variation de la résistance en compression en fonction de la vitesse de vibration.

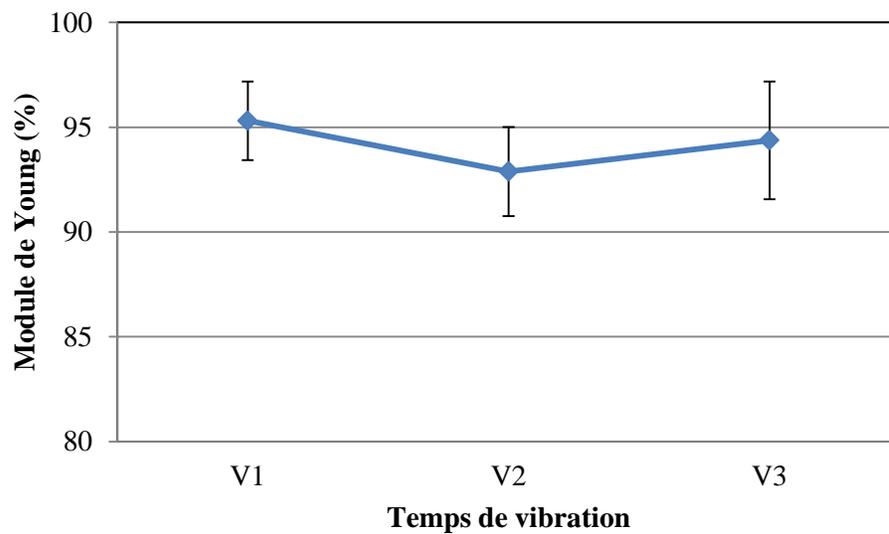


Figure 5.16 : Variation du module de Young en fonction de la vitesse de vibration.

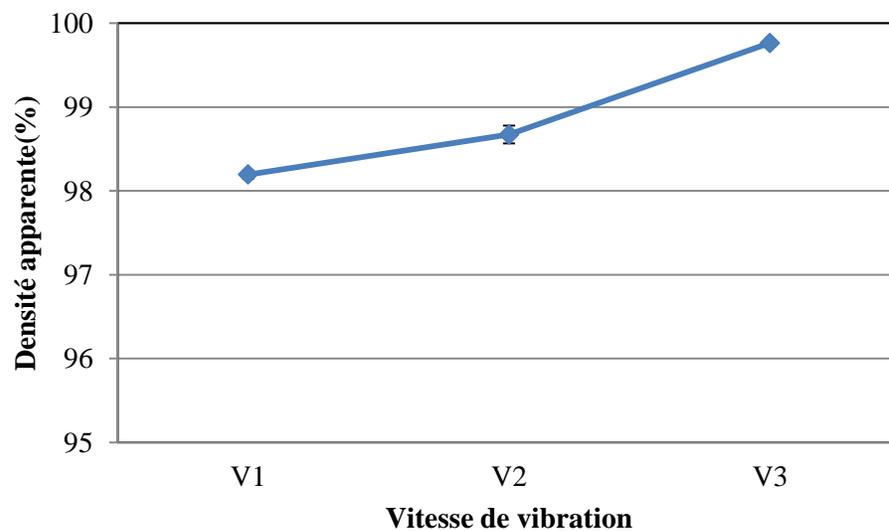


Figure 5.17 : Variation de la densité apparente en fonction de la vitesse de vibration.

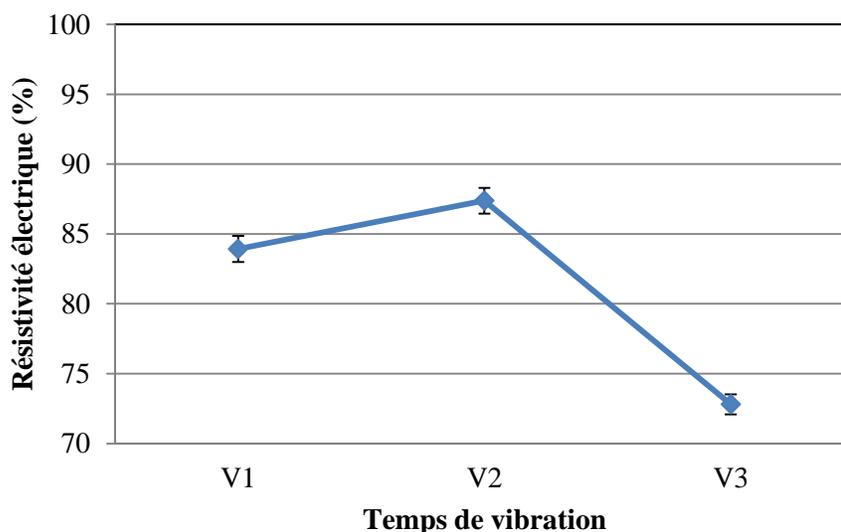


Figure 5.18 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la vitesse de vibration.

En diminuant la vitesse d'opération standard du laboratoire $V2$ de 190 RPM, la résistance en flexion est restée relativement stable. Cependant, en augmentant la vitesse de vibration standard $V2$ de 85 RPM, la résistance en flexion a augmenté de 85 à 90 %. Une diminution de 3 % de la résistance en compression est notée au passage de la vitesse $V2$ à la vitesse $V1$. En augmentant la vitesse standard $V2$ à la vitesse $V3$, la résistance en compression a augmenté de 1 %. En augmentant la vitesse de vibration de $V1$ à $V3$, la variation du module de Young était très faible. Par contre, l'effet de l'augmentation de la vitesse sur la densité apparente est bien visible. La densité apparente a augmenté de 1,1 % par rapport à la densité de l'anode standard. La résistivité électrique a baissé en augmentant la vitesse de vibration par contre en la baissant elle a aussi baissé. Donc, afin de vraiment comprendre cette situation, il est recommandé de faire une cuisson afin de réellement analyser cette variation de la résistivité électrique. Généralement, la résistivité électrique des anodes crues augmente avec l'augmentation des fissures et aussi la quantité du brai. La

même recommandation peut être faite pour les propriétés mécaniques, afin de voir si cette variation de vitesse est négligeable pour les propriétés mécaniques ou non.

Pour conclure, en général lorsque la vitesse de vibration augmente les différentes propriétés augmentent [70]. C'est au début du procédé que le plus grand pourcentage des propriétés est atteint vu la malléabilité de la pâte au début du cycle de formage. Cependant, comme toujours chaque augmentation a ces propres limites que ce soit au niveau de l'équipement ou de la qualité produite. Il faut se rappeler que la vitesse de vibration est en puissance de deux dans la formule de la force de vibration (équation 2.1). Donc, son influence sur la qualité des anodes produites est très significative.

5.3.3. Variation du temps de vibration

Les comparaisons des résultats des propriétés physiques et mécaniques des trois anodes crues du laboratoire au tableau 5.11 fabriquées en fonction des temps t_1 , t_2 et t_3 sont présentées dans cette section. Le temps t_2 représente le temps standard utilisé pour la fabrication des anodes du laboratoire. Tous les autres paramètres sont maintenus constants. Donc, au total douze échantillons ont été testés pour ce cas d'étude. Le tableau 5.12 présente le nombre de tests effectués pour chaque échantillon d'une anode selon le plan de la figure 5.7.

Tableau 5.11 : Anodes du laboratoire fabriquées avec des temps de vibration variables.

Anodes	Déplacement	Vitesse	Temps	Charge	Pression
1	D_2	V_2	t_2	C_2	P_2
5	D_2	V_2	$t_1 < t_2$	C_2	P_2
6	D_2	V_2	$t_3 > t_2$	C_2	P_2

Tableau 5.12 : Différents échantillons testés – Temps de vibration variable.

Tests	Anode 1	Anode 5	Anode 6
	Échantillons testés		
Résistance en flexion	3	3 et 4	3 et 4
Résistance en compression	1 et 2	1 et 2	1 et 2
Module de Young	1 et 2	1 et 2	1 et 2
Densité apparente	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4
Résistivité électrique	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4

Les résultats des caractérisations physiques et mécaniques obtenus en variant le temps de vibration sont présentés au tableau 5.13. Les figures suivantes : figure 5.19, figure 5.20, figure 5.21, figure 5.22 et figure 5.23 montrent respectivement les résultats des

résistances en flexion, en compression, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité électrique pour les temps de vibration testés.

Tableau 5.13 : Propriétés physiques et mécaniques – Temps variable.

Anode	Calculs	Résistance en flexion (%)	Résistance en compression (%)	Module de Young (%)	Densité apparente (%)	Résistivité électrique (%)
1	Moyenne	85,08	91,46	92,89	98,67	87,38
	Écart type		10,92	6,02	0,42	8,67
5	Moyenne	80,79	79,40	84,91	96,67	94,84
	Écart type	7,05	8,01	3,79	0,73	4,17
8	Moyenne	98,68	95,47	91,52	98,80	88,39
	Écart type	1,87	6,41	11,99	0,43	5,53

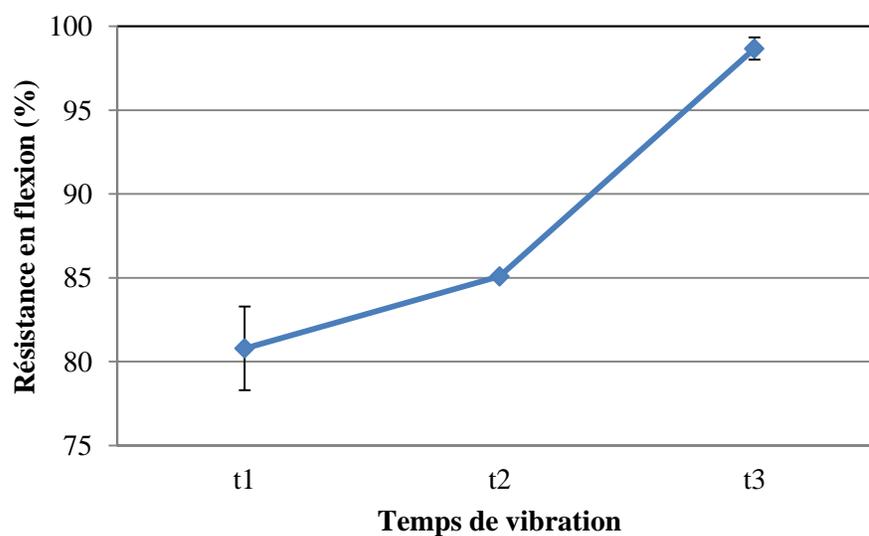


Figure 5.19 : Variation de la résistance en flexion en fonction du temps de vibration.

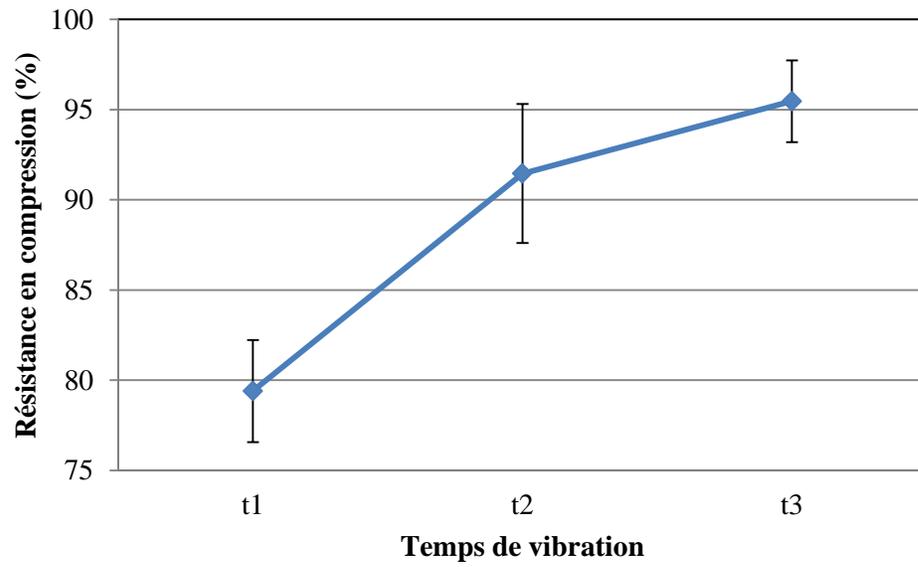


Figure 5.20 : Variation de la résistance en compression en fonction du temps de vibration.

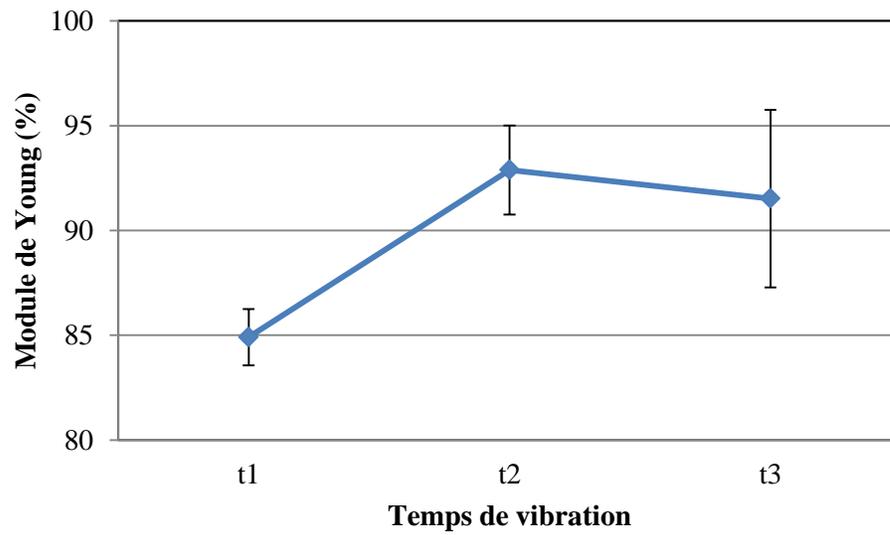


Figure 5.21 : Variation du module de Young en fonction du temps de vibration.

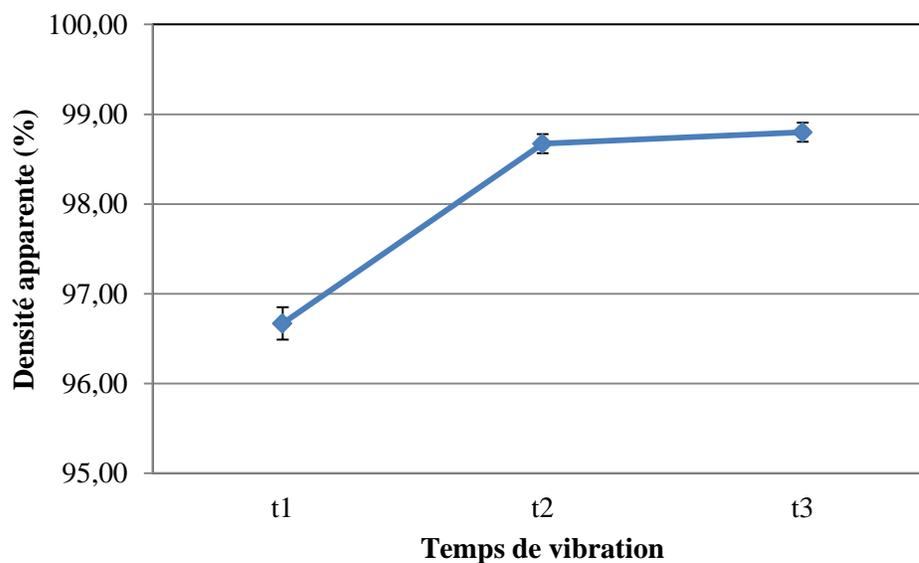


Figure 5.22 : Variation de la densité apparente en fonction du temps de vibration.

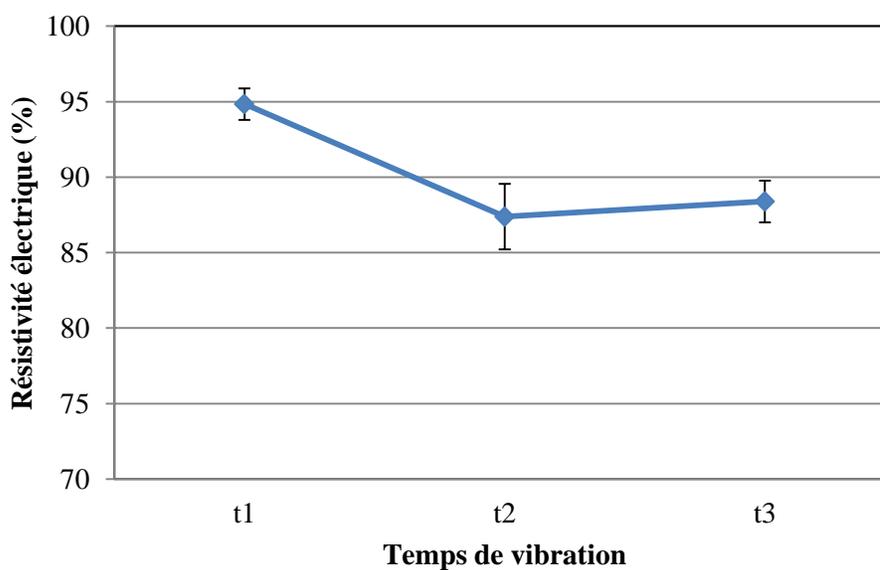


Figure 5.23 : Variation de la résistivité électrique en fonction du temps de vibration.

En baissant le temps de vibration de 10 secondes par rapport au temps standard t_2 , toutes les propriétés ont baissé sauf la résistivité électrique qui a augmenté. En augmentant

le temps de vibration de 15 secondes par rapport au temps t_2 , les résistances en flexion et en compression ont augmenté. Par contre, une faible diminution du module de Young a été remarquée en passant du temps de vibration t_2 à t_3 . Pour ce qui est de la densité et de la résistivité électrique, de faibles variations sont survenues pour le temps t_3 . Augmentation de la densité apparente de 0,13 % et une baisse de la résistivité électrique de 1 %. Donc, en général avec l'augmentation du temps de vibration, les différentes propriétés augmentent sauf la résistivité électrique. Par contre, une augmentation excessive du temps de vibration conduirait à une sur-compaction pouvant générer des fissures après la cuisson. Comme déjà discuté à la section précédente, c'est au début du procédé que le plus grand pourcentage des propriétés est atteint. Par la suite, l'augmentation est plus faible, mais importante au niveau de la qualité des anodes. Cependant, un temps minimum de vibro-compaction est nécessaire pour les propriétés physiques des anodes.

Il faut savoir qu'arrivée à un certain niveau de temps de vibration, la densité n'augmente pas beaucoup comparée aux propriétés mécaniques. Il est important d'avoir un certain niveau de propriétés mécaniques élevées, mais si elles sont trop élevées, cela va engendrer des problèmes de choc thermique. Donc il y'a un compromis à faire, en augmentant la densité, il va falloir faire attention à ne pas avoir des anodes trop rigides (propriétés mécaniques trop élevées) qui pourront engendrer des problèmes de choc thermique. Dans le cas de ce projet, l'évaluation de la résistance au choc thermique n'a pas été faite. Cependant, cette évaluation de la résistance au choc thermique serait une très bonne continuité pour cette étude.

5.3.4. Variation de la charge morte

Les comparaisons des résultats des propriétés physiques et mécaniques des deux anodes crues du laboratoire au tableau 5.14 fabriquées en fonction des charges $C1$ et $C2$ sont présentées dans cette section. La charge $C2$ représente la charge morte standard utilisée pour la fabrication des anodes du laboratoire. Tous les autres paramètres sont maintenus constants. Donc, au total huit échantillons ont été testés pour ce cas d'étude. Le tableau 5.15 présente le nombre de tests effectués pour chaque échantillon d'une anode selon le plan de la figure 5.7.

Tableau 5.14 : Anodes du laboratoire fabriquées avec des charges mortes variables.

Anodes	Déplacement	Vitesse	Temps	Charge	Pression
1	$D2$	$V2$	$t2$	$C2$	$P2$
7	$D2$	$V2$	$t2$	$C1 < C2$	$P2$

Tableau 5.15 : Différents échantillons testés – Charge morte variable.

Tests	Anode 1	Anode 7
	Échantillons testés	
Résistance en flexion	3	3 et 4
Résistance en compression	1 et 2	1 et 2
Module de Young	1 et 2	1 et 2
Densité apparente	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4
Résistivité électrique	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4

Les résultats des caractérisations physiques et mécaniques obtenus en variant la charge morte sont présentés au tableau 5.13. Les figures suivantes : figure 5.24, figure 5.25, figure 5.26, figure 5.27 et figure 5.28 montrent respectivement les résultats des résistances en flexion, en compression, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité électrique pour les charges mortes testées.

Tableau 5.16 : Propriétés physiques et mécaniques – Charge variable.

Anode	Calculs	Résistance en flexion (%)	Résistance en compression (%)	Module de Young (%)	Densité apparente (%)	Résistivité électrique (%)
1	Moyenne	85,08	91,46	92,89	98,67	87,38
	Écart type		10,92	6,02	0,42	8,67
7	Moyenne	81,29	91,42	94,09	97,69	92,97
	Écart type	2,91	1,33	3,67	0,35	3,12

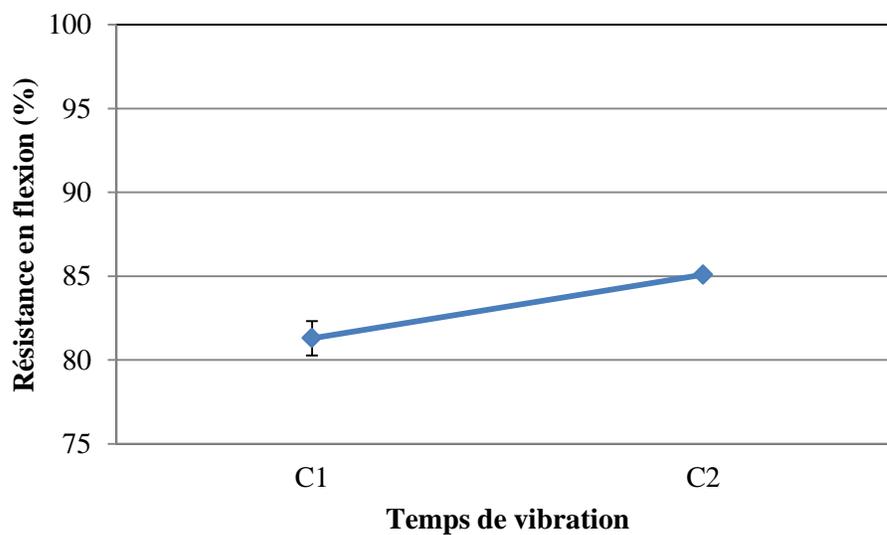


Figure 5.24 : Variation de la résistance en flexion en fonction de la charge.

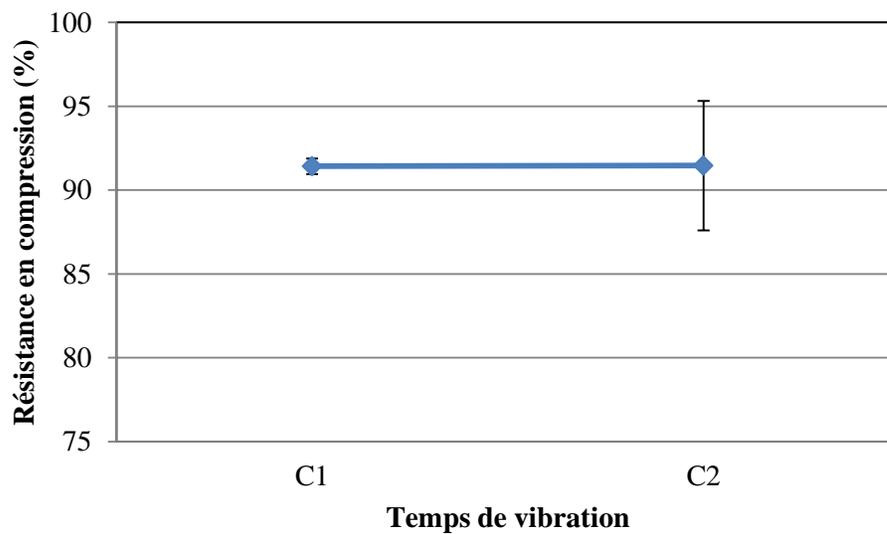


Figure 5.25 : Variation de la résistance en compression en fonction de la charge.

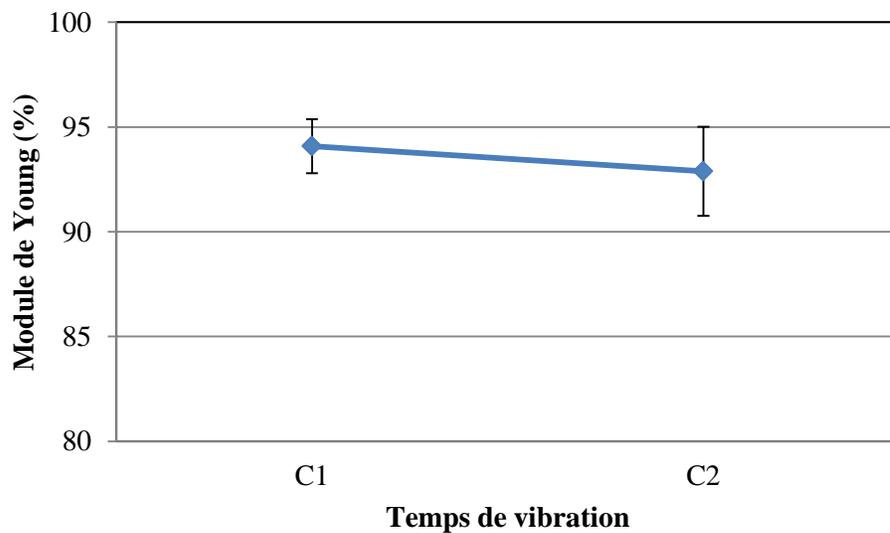


Figure 5.26 : Variation du module de Young en fonction de la charge.

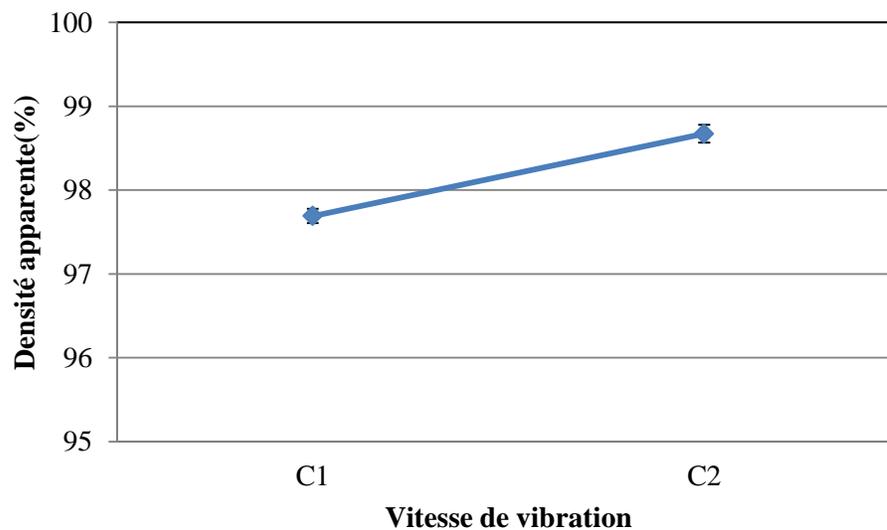


Figure 5.27 : Variation de la densité apparente en fonction de la charge.

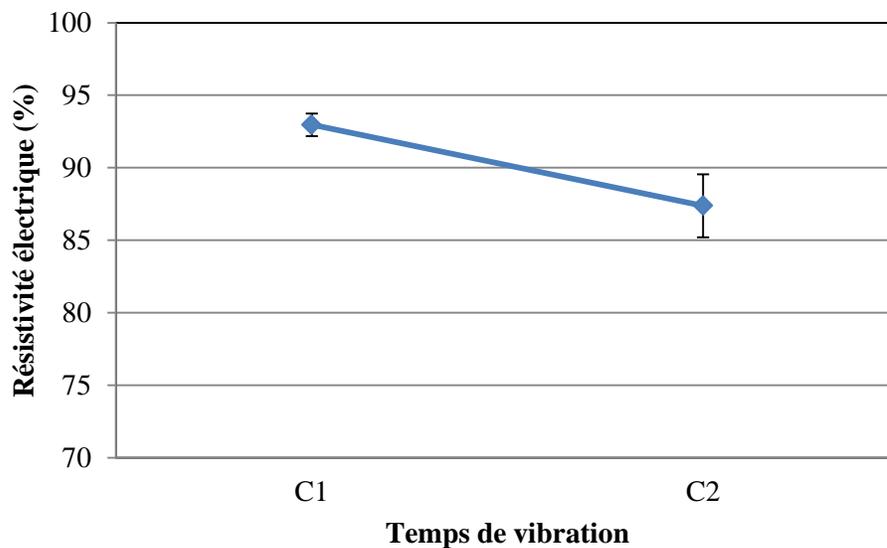


Figure 5.28 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la charge.

Lorsque la charge morte a été baissée de 17 kg par rapport à la charge standard C2, la résistance en flexion et la densité apparente ont baissé et la résistivité électrique a augmenté. Pour ce qui est de la résistance en compression et du module de Young, ils sont

restés relativement constants après la baisse de la charge morte. Donc, cette diminution de charge n'est pas considérablement importante pour pouvoir changer ces deux paramètres mécaniques.

Pour conclure, la diminution de la charge morte appliquée sur l'anode fait diminuer les différentes propriétés, ce qui est logique, car plus la force par-dessus l'anode est élevée, plus cette dernière permet d'avoir une meilleure compaction de la pâte d'anode. Cependant, une sur-compaction due à une charge excessive n'est pas souhaitable, car cela pourrait engendrer la formation prématurée des fissures. La limite maximum de charge morte qui peut être appliquée par-dessus l'anode dépend de deux critères essentiels. Le premier c'est au niveau de la capacité du vibro-compacteur, il faut que l'équipement puisse soulever le système entier et le faire vibrer sous cette charge en toute sécurité. Le deuxième critère, c'est au niveau de la qualité produite. Des propriétés élevées ne sont pas nécessairement souhaitables.

5.3.5. Variation de la pression de charge

Les comparaisons des résultats des propriétés physiques et mécaniques des deux anodes crues du laboratoire au tableau 5.17 fabriquées en fonction des pressions $P1$ et $P2$ sont présentées dans cette section. La pression $P2$ indique la pression de charge standard utilisée pour la fabrication des anodes du laboratoire. Tous les autres paramètres sont maintenus constants. Donc, au total huit échantillons sont testés pour ce cas d'étude. Le tableau 5.18 présente le nombre de tests effectués pour chaque échantillon d'une anode selon le plan de la figure 5.7.

Tableau 5.17 : Anodes du laboratoire fabriquées avec des pressions de charge variables.

Anodes	Déplacement	Vitesse	Temps	Charge	Pression
1	<i>D2</i>	<i>V2</i>	<i>t2</i>	<i>C2</i>	<i>P2</i>
8	<i>D2</i>	<i>V2</i>	<i>t2</i>	<i>C2</i>	<i>P1 < P2</i>

Les résultats des caractérisations physiques et mécaniques obtenus en variant la pression de charge du ballon du haut sont présentés au tableau 5.13. Les figures suivantes : figure 5.29, figure 5.30, figure 5.31, figure 5.32 et figure 5.33 montrent respectivement les résultats des résistances en flexion, en compression, du module de Young, de la densité apparente et de la résistivité électrique pour les pressions de charge testées.

Tableau 5.18 : Différents échantillons testés – Pression de charge variable.

Tests	Anode 1	Anode 8
	Échantillons testés	
Résistance en flexion	3	3 et 4
Résistance en compression	1 et 2	1 et 2
Module de Young	1 et 2	1 et 2
Densité apparente	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4
Résistivité électrique	1, 2, 3 et 4	1, 2, 3 et 4

Tableau 5.19 : Propriétés physiques et mécaniques – Pression variable.

Anode	Calculs	Résistance en flexion (%)	Résistance en compression (%)	Module de Young (%)	Densité apparente (%)	Résistivité électrique (%)
1	Moyenne	85,08	91,46	92,89	98,67	87,38
	Écart type		10,92	6,02	0,42	8,67
8	Moyenne	83,91	81,15	83,19	97,37	96,39
	Écart type	11,06	4,38	8,12	0,27	2,97

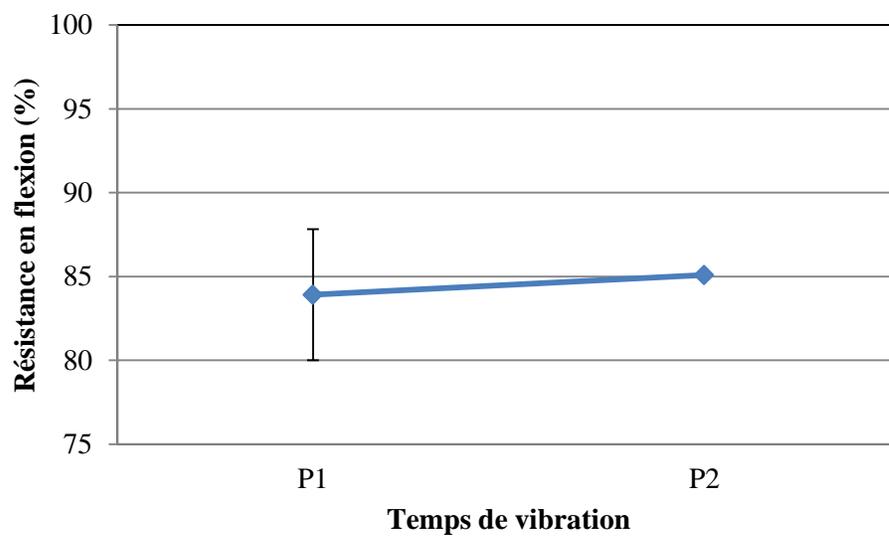


Figure 5.29 : Variation de la résistance en flexion en fonction de la pression.

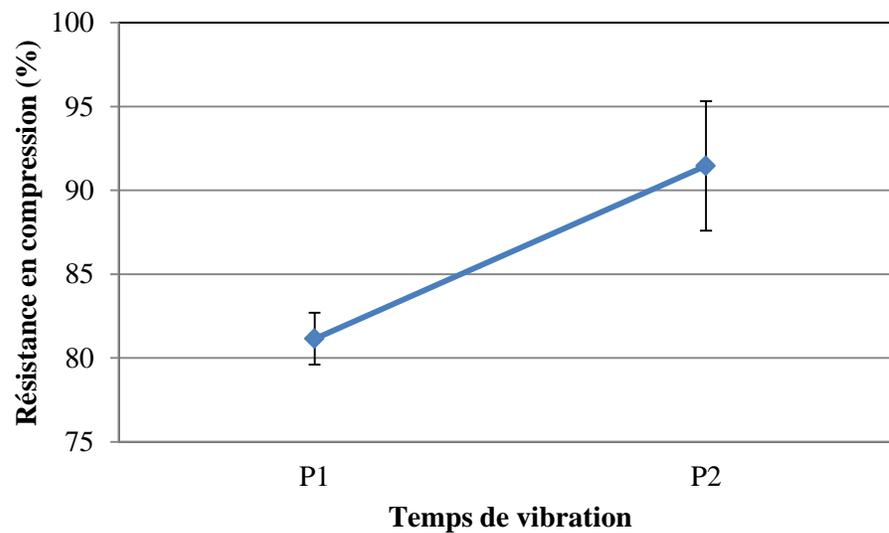


Figure 5.30 : Variation de la résistance en compression en fonction de la pression.

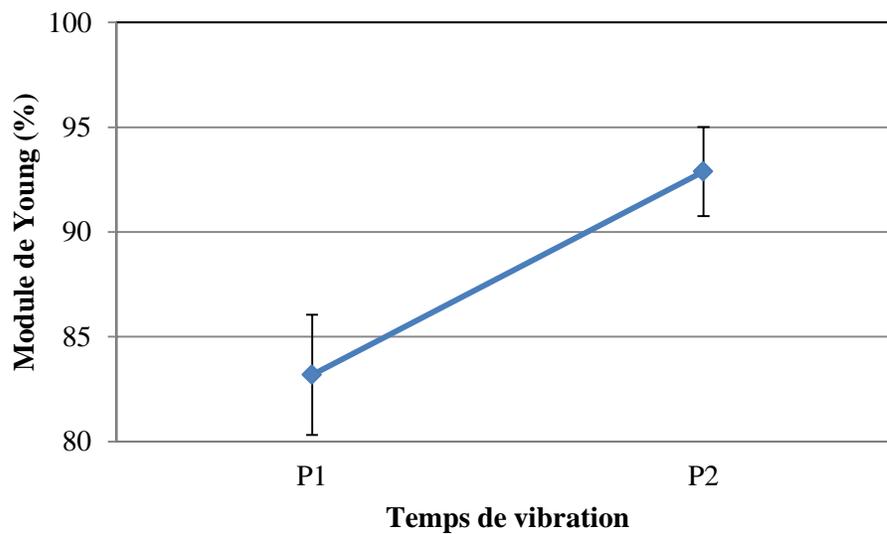


Figure 5.31 : Variation du module de Young en fonction de la pression.

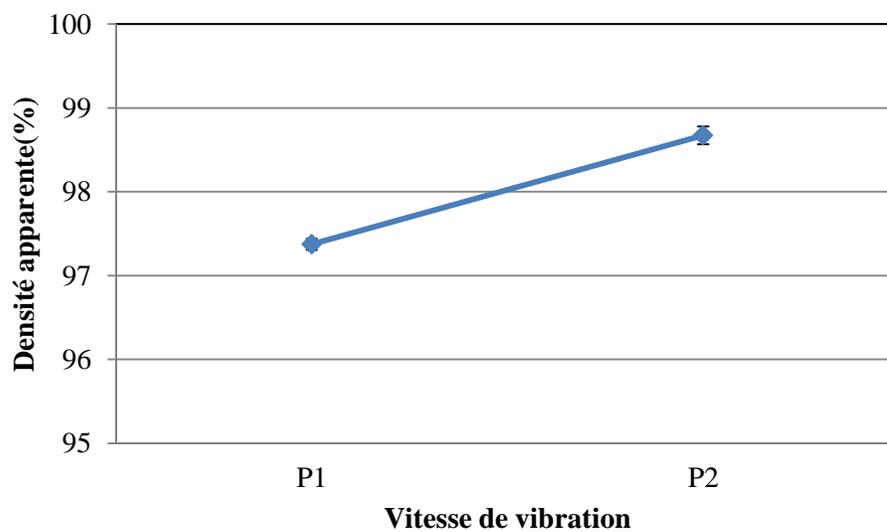


Figure 5.32 : Variation de la densité apparente en fonction de la pression.

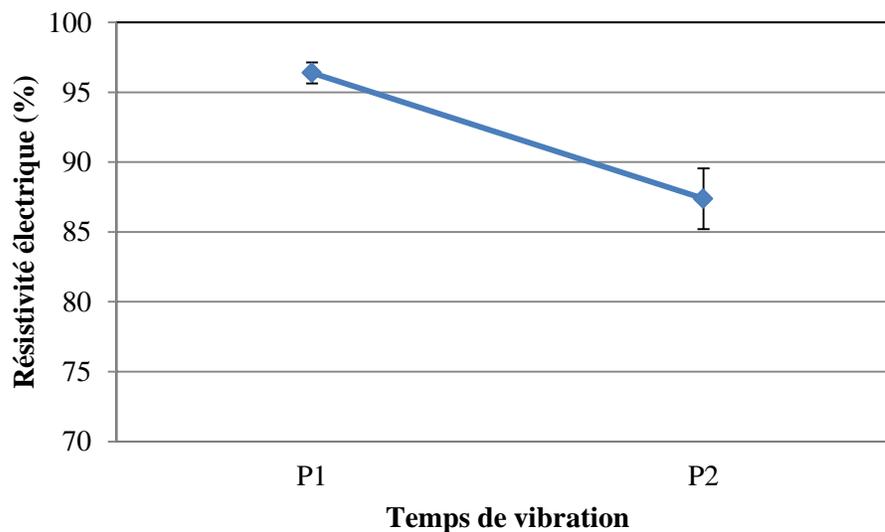


Figure 5.33 : Variation de la résistivité électrique en fonction de la pression.

Lorsque la pression de charge du ballon du haut a été baissée de 10 psi par rapport à la pression d'opération standard du laboratoire *P2*, les propriétés mécaniques et la densité apparente ont baissé. La résistivité électrique a augmenté avec cette baisse de pression. La diminution de la résistance en compression et du module de Young était plus importante comparée à la résistance en flexion. Donc, la résistance en compression et le module de Young sont bien plus influencés par la variation de la pression de charge comparée à la résistance en flexion. Ce fait a été aussi constaté lors de l'analyse des composantes principales réalisée sur les anodes industrielles au tableau 3.22. Pour conclure, la pression de charge permet d'augmenter les différentes propriétés et diminuer la résistivité électrique, cependant une pression excessive va engendrer la création de contraintes mécaniques dans l'anode qui par la suite va conduire à des fissures après la cuisson.

5.4. Comparaison des tendances (laboratoire-industrie)

Dans cette section, une comparaison des tendances obtenues en laboratoire et aussi au niveau de l'industrie est présentée avec un rappel des résultats présentés dans la littérature se référant aux paramètres étudiés.

5.4.1. Pression de charge

La pression de charge est un des paramètres qui ont été étudiés au niveau du laboratoire de même qu'au niveau industriel. Avec l'augmentation de la pression de charge, les propriétés physiques et mécaniques s'améliorent. Cependant, ce paramètre a ses limites. Pour savoir le maximum de charge qui peut être appliquée (toujours dans les capacités de l'équipement), il faut faire la cuisson et par la suite vérifier si les fissures augmentent et si les propriétés physiques et mécaniques changent. Ce paramètre a aussi une importance au niveau de la synchronisation de la vibration de la table avec la tige guide qui permet d'avoir des anodes plus homogènes avec de faibles écarts entre les propriétés des parties du haut et du bas, mais aussi au niveau des accélérations au niveau de la table et de la tige. Lorsque l'écart entre les propriétés des parties du haut et du bas est élevé, cela pourrait conduire à la formation de fissures horizontales des anodes qui seront rejetées par la suite sans même être cuites.

- **En laboratoire**

L'analyse des résultats des anodes crues formées en laboratoire avec une pression de charge variable a montré que lorsque la pression de charge a été diminuée, les différentes propriétés ont détérioré. Ce résultat est présenté à la section 5.3.5 de ce même chapitre. Une

augmentation de la pression de charge n'a pas pu être faite à cause de la capacité de l'équipement. La pression d'opération standard du laboratoire se situe à la capacité de charge maximum qui peut être appliquée.

- **Littérature**

Dans la littérature, des tests ont été faits avec et sans pression de charge et les résultats ont montré des diminutions de la densité dans le cas des tests sans pression de charge (voir figure 2.14). Le cas (a) est avec pression et le cas (c) est sans pression de charge. Donc, les tests réalisés au niveau du laboratoire (figure 5.32 variation de la densité en fonction de la pression) reflètent bien la littérature.

- **En industrie**

Les résultats de la campagne de 2012 au chapitre 3 des vibro-compacteurs B et D qui avaient des pressions de charge différentes (voir tableau 3.2 et tableau 3.3) ont montré que lorsque la pression de charge est élevée, les différentes propriétés ont augmentées. Cependant, si cette pression est trop élevée pour un temps de vibration élevé, elle pourrait engendrer la formation des fissures après cuisson à cause des contraintes mécaniques existantes [104].

5.4.2. Temps de vibration

Le temps de vibration a aussi été étudié en laboratoire de même que chez l'industrie. En augmentant le temps de vibration, les différentes propriétés physiques et mécaniques s'améliorent aussi. Cependant, comme la pression de charge, ce paramètre possède aussi

ces limites. Si le temps de vibration utilisé est trop élevé, cela va conduire à la formation des fissures dans les anodes après la cuisson. C'est le cas d'une sur-compaction. Par contre, si le temps de vibration est trop court, la qualité de l'anode formée sera moins bonne.

- **En laboratoire**

Lors de la formation des anodes en laboratoire avec des paramètres de vibro-compaction variables, le temps de vibration faisait partie des paramètres qui ont été variés durant cette étude. L'analyse des résultats obtenus à la section 5.3.3 a montrée qu'avec l'augmentation du temps de vibration, les différentes propriétés s'améliorent. Par contre, l'augmentation des différentes propriétés été plus prononcé au temps de vibration t_1 comparée au temps de vibration t_3 ce qui indique qu'il y'a un temps minium de compaction pour la fabrication d'anode.

- **Littérature**

Dans la littérature aussi, les études faites par Hulse [70] ont montré que lorsque le temps de vibration augmente, les différentes propriétés s'améliorent (voir tableau 2.3 et tableau 2.4). La même tendance est observée à la figure 2.7 pour la densité apparente des anodes crues [70]. Donc, les tests réalisés au niveau du laboratoire (figure 5.22, variation de la densité en fonction du temps) reflètent bien la littérature.

- **En industrie**

Durant la campagne de 2012, le temps de vibration a été baissé de sept secondes comparées au temps de vibration standard en usine. Avec cette réduction du temps de

vibration, les moyennes obtenues pour les différentes propriétés dans certains vibro-compacteurs ont montré une petite diminution comparée aux anodes crues formées au temps de vibration standard T2. L'analyse statistique de ce paramètre présente une valeur de p supérieur à 0,05. Donc, même s'il y'avait une diminution de la moyenne des différentes propriétés pour certains vibro-compacteurs ayant certaines conditions d'opération, cette diminution est considérée non significative statistiquement.

5.4.3. Résumé de l'impact des paramètres de vibro-compaction sur la qualité des anodes

L'impact de la pression de charge de même que le temps de vibration ont déjà été discutés dans les sections précédentes. Maintenant, c'est l'impact du déplacement (excitation), de la vitesse, de la charge morte et de la pression de charge des ballons du bas qui sont résumées dans cette section.

- **Déplacement-Excitation**

Le déplacement généré par les excentriques (balourd) est un paramètre qui a été étudié en laboratoire. En variant le déplacement de l'excitation, l'amplitude de la force de vibration change. Lorsque l'amplitude de la force de vibration est élevée, cela conduit à la formation d'anodes avec des propriétés plus élevées, car cette force permet de vibro-compacter plus l'anode formée. Ce paramètre dépend lui aussi de la capacité de l'équipement. Si la force de vibration est trop élevée, cela pourrait conduire aux bris des composantes de la machine. Au niveau de l'industrie, c'est en baissant l'angle des contrepoids du balourd que la force de vibration augmente [70, 75].

- **Vitesse de vibration**

La variation de la vitesse de vibration permet aussi de changer les propriétés des anodes formées. Au laboratoire, c'est la densité qui a été le plus affectée par le changement de la vitesse de vibration. Lorsque la vitesse de vibration augmente, la force de vibration augmente aussi, donc un maximum de force est appliqué sur l'anode donnant ainsi le maximum au niveau de la densité. Cependant, une densité élevée n'est pas toujours souhaitable et il ne faut pas aussi oublier que ce paramètre dépend de la capacité de l'équipement.

- **Charge morte**

La charge morte représente tout le contrepoids mort qui est appliqué par-dessus l'anode lors de la vibro-compaction excluant la pression des ballons de charge. En augmentant la charge morte, l'anode devient plus compactée. Ce paramètre peut être combiné avec la force de vibration. Lorsque la charge morte appliquée est trop élevée, cela pourrait engendrer la formation des fissures et par le fait même le bris des particules de coke. En augmentant la charge morte, il faut s'assurer que le montage (moteur, balourd) peut bien soulever toute la charge. Sinon, il faut prévoir un autre montage dans la nécessité de vouloir une plus grande charge morte pour avoir des propriétés plus élevées. Au niveau du vibro-compacteur du laboratoire, le système est déjà à son maximum, c'est pour cela que ce n'était pas possible d'augmenter la charge morte durant les tests.

- **Ballons du bas (isolation vibratoire)**

Auparavant, les ressorts en acier ont été utilisés pour les isolations vibratoires des vibro-compacteurs. Par la suite, ce sont les blocs en caoutchoucs et maintenant c'est les ballons de charge à pressions variable qui sont utilisés. Les ballons du bas permettent de soulever toute la structure et ils permettent aussi d'isoler le système (réduire les vibrations transmises au sol). Il faut ajuster la pression de ces ballons, de manière à soulever toute la structure et aussi de garder une certaine souplesse pour ne pas revenir au cas des blocs en caoutchoucs qui eux sont plus rigides. Si la pression de ces ballons est trop faible, cela pourrait conduire à des vibrations horizontales de la structure. Un bon ajustement de cette pression des ballons du bas pourrait permettre de réduire l'écart entre les propriétés des parties du haut et du bas de l'anode. Ce paramètre a été étudié chez le partenaire industriel pour des fins d'amélioration du fonctionnement des vibro-compacteurs industriels.

5.5. Application au niveau industriel

Pour des fins de validation et d'application de l'effet de la variation de la pression de charge des ballons du haut de même que celle des ballons du bas sur la qualité des anodes industrielles crues et cuites, une autre série de tests a été conduite chez le partenaire industriel. Cette série de tests porte sur la variation de la pression de charge des ballons du haut avec ceux du bas afin d'améliorer les résultats de la campagne 2012 portée sur l'homogénéité des propriétés dans l'anode (parties du haut et du bas). Les analyses des résultats de la campagne de 2012 ont montré qu'il existe un écart élevé entre les propriétés

des parties du haut et du bas pour les vibro-compacteurs C et D (surtout le vibro-compacteur D- voir section 3.3.2).

Les pressions des ballons du haut (pression de charge) de même que ceux du bas (isolation vibratoire) ont été variées tout en gardant une certaine souplesse au niveau de leurs rigidités et aussi en respectant le minimum de charge (ballon du bas) suggéré par la charte des ballons du fournisseur. Un aperçu de la variation de la densité apparente normalisée par rapport à la valeur maximale des anodes crues du vibro-compacteur D pour différentes pressions des ballons du haut et du bas est présenté à la figure 5.34. Avec l'augmentation de la pression de charge des ballons du haut, la densité apparente augmente. La même chose pour la pression des ballons bas, cependant à ce niveau l'augmentation de la densité est plus faible comparée aux ballons du haut. Le pas de variation de la pression des ballons du haut et du bas est le même.

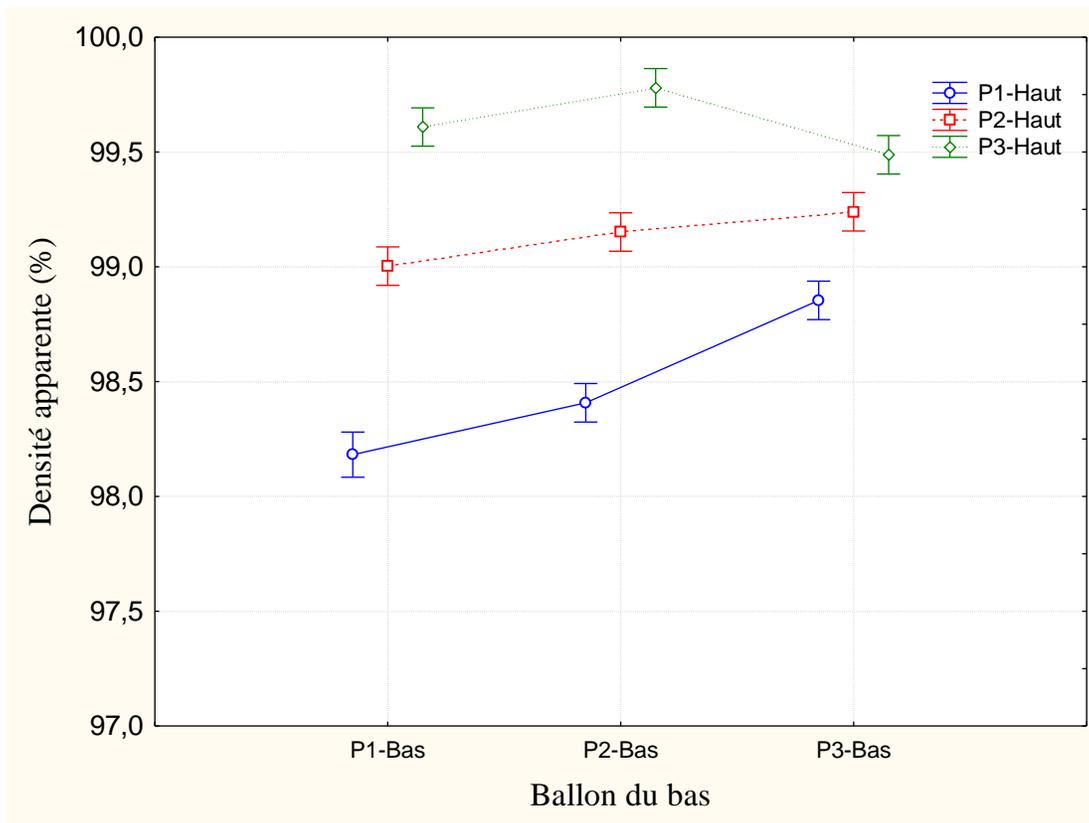


Figure 5.34 : Variation de la densité des anodes crues en fonction des pressions des ballons du haut et du bas ($P3 > P2 > P1$).

5.6. Conclusions

Dans ce chapitre, une calibration du vibro-compacteur du laboratoire réalisée avec de la pâte d'anode est présentée. Cette calibration a permis de confirmer les résultats des tests à vide présentés au chapitre 4. En augmentant la vitesse de vibration, l'accélération mesurée augmente.

Durant la fabrication des anodes en laboratoire, il faut s'assurer toujours de contrôler les différents paramètres d'opération que ce soit les températures de préchauffage, le malaxage ou le procédé de vibro-compaction. Si un de ces paramètres n'est pas bien contrôlé, il faut refaire l'anode. Les températures de préchauffage des matières premières ainsi que du vibro-compacteur doivent être contrôlées à l'aide de thermocouples en permanence. L'état du vibro-compacteur doit être vérifié avant et après utilisation avec les mesures vibratoires afin de minimiser les bris qui surviennent sur cette machine. Il faut savoir qu'un petit jeu dans les pièces mécaniques du vibro-compacteur ou une mise à niveau non adéquate du système engendre souvent le bris des équipements à cause des vibrations.

Dans le cas de cette étude, la fabrication des anodes avec des paramètres de vibro-compaction variables s'est avérée un peu critique, car elle dépend des équipements. La plage de variation des paramètres d'étude est réduite par rapport au plan expérimental initial puisque pour la fabrication d'anode de bonnes qualités exigent l'utilisation de la plage supérieure d'opération du vibro-compacteur du laboratoire. Les paramètres standards de fabrication des anodes au laboratoire sont déjà au maximum que peut supporter le vibro-

compacteur. Malgré cela, le plan expérimental utilisé a permis plusieurs variations de paramètres telles que : la vitesse de vibration, le déplacement des excentriques, le temps de vibration, la charge morte et la pression de charge durant la fabrication des anodes pour ce projet.

À cause du temps et des matières premières, ce n'était pas possible de répéter chacune des expériences plusieurs fois. Pourtant, les répétitions ont été faites autant de fois que possible. Afin de mieux voir les tendances, l'analyse a été réalisée en utilisant les moyennes. Dans certains cas l'écart type est élevé, cela est dû au nombre d'expériences et aussi à la combinaison de certaines anodes où les conditions de fabrication étaient un peu différentes. Une raison très importante à l'existence de certaines variations, c'est la non-homogénéité des matières premières utilisées pour la fabrication de ces anodes. Durant la préparation des recettes pour chacune des anodes, la granulométrie de même que les conditions de fabrication étaient maintenues les mêmes le plus possible. Cependant, il peut y avoir des différences. Pour exemple, en utilisant un certain pourcentage d'agrégat (inférieur à 4 mm et supérieur à 2 mm-Tamis de 2 mm), ce n'est pas possible de savoir si la plupart des particules étaient proches de 2 ou de 4 mm. Cela peut influencer les propriétés.

Les caractérisations des anodes crues avant carottage ont permis d'avoir une approximation sur la qualité des anodes formées. Les résultats des caractérisations des échantillons carottés sur chaque anode montrent qu'en augmentant le temps et la vitesse de vibration, la qualité des anodes produites s'améliore. En moyenne, les propriétés physiques

et mécaniques des anodes détériorent en réduisant les différents paramètres que ce soit le temps, la vitesse, le déplacement, la charge et la pression.

La variation des propriétés mécaniques durant cette étude n'était pas vraiment élevée comparée à celles de la densité et de la résistivité. Cependant, ce serait intéressant de voir qu'est-ce que ces différents paramètres vont donner comme variation lorsque les anodes sont cuites. Pour des travaux futurs, la cuisson de ces anodes crues permettrait de faire une validation des gains en densité et en résistivité obtenus afin de fabriquer des anodes de haute qualité en maintenant la densité et la résistivité électrique. Puisqu'il est connu que la fissuration peut survenir à la cuisson.

CHAPITRE 6

DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES DYNAMIQUES POUR UN VIBRO-COMPACTEUR

6.1. Introduction

Ce chapitre comporte la modélisation dynamique du vibro-compacteur. En premier lieu, un modèle dynamique du vibro-compacteur à un degré de liberté (1-DDL) a été développé. Ce modèle simule le comportement du vibro-compacteur. Un modèle à deux degrés de liberté (2-DDL) du vibro-compacteur est aussi développé dans ce projet en prenant en considération la variation de la rigidité de la pâte d'anode. Les résultats et les validations obtenus lors de ces modélisations sont présentés dans ce chapitre.

6.2. Modèle à 1-DDL

Une machine vibrante qui est montée sur des supports élastiques représente toujours une fréquence de résonance caractéristique qui dépend du poids de la machine ainsi que de la rigidité de l'ensemble de la structure. Si la machine est légère et le support rigide, la fréquence de résonance sera élevée. Une machine lourde sur un support très élastique a au contraire une fréquence de résonance basse [105]. Afin de mieux maîtriser ce qui se passe au niveau d'un vibro-compacteur, un modèle dynamique à un degré de liberté (1-DDL) est

développé sous l'interface Simulink. Ce modèle est aussi développé avec un programme sous Matlab®. Le vibro-compacteur est modélisé comme étant une masse rigide M_T suspendue sur des ressorts k_T et des amortisseurs b_T et soumise à une excitation sinusoïdale extérieure $f(t)$. La figure 6.1 montre le modèle dynamique à 1-DDL développé. Dans le cas de ce modèle, le seul mouvement possible du vibro-compacteur est un déplacement vertical (x). Ce modèle est utilisé pour calculer les accélérations, les vitesses et les déplacements du vibro-compacteur pour différentes fréquences d'opération de même que des angles variables du balourd. Donc, ce modèle permet d'établir certaines grandes tendances du comportement d'un vibro-compacteur regard des paramètres variables.

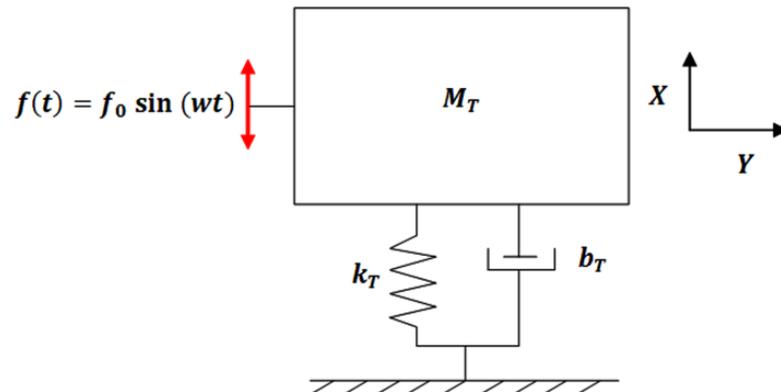


Figure 6.1 : Modèle dynamique à 1-DDL du vibro-compacteur.

6.2.1. Résolution mathématique du modèle à 1-DDL

La masse totale du vibro-compacteur est égale à la somme des masses de la table vibrante, de l'anode, du moule ainsi que le couvercle et la pression de charge. La mise en équation du modèle dynamique du vibro-compacteur est présentée à l'équation (6.1). Les

équations (6.2) et (6.3) montrent la force d'excitation du vibro-compacteur engendré par les contrepoids qui sont entraînés en rotation par le moteur. Elle est représentée comme étant une force sinusoïdale agissante sur le système.

$$M_T \ddot{x} + b_T \dot{x} + k_T x = f(t) \quad (6.1)$$

$$f(t) = f_0 \sin(\omega t) \quad (6.2)$$

et

$$f_0 = m e \omega^2 \quad (6.3)$$

m : masse du balourd [kg].

e : excentricité [m].

ω : vitesse de vibration [rad/s].

t : temps de vibration [s].

$\ddot{x} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$ est l'accélération de la masse et $\dot{x} = \frac{\partial x}{\partial t}$ sa vitesse

L'équation (6.1) est résolue en utilisant deux approches; analytique et numérique. La méthode analytique correspond à la détermination de la solution générale de l'équation (6.1) analytiquement (équations du mouvement d'un système à 1-DDL sous amorti). Par la suite, afin de trouver les différents paramètres de cette solution et de tracer les graphes du déplacement en fonction du temps, l'outil Matlab® a été utilisé. Quant à la méthode numérique, la solution de cette équation est obtenue en utilisant l'interface Simulink par la construction de schémas blocs. Les équations sont réécrites de manière à s'adapter au calcul numérique. Les valeurs numériques des paramètres du vibro-compacteur utilisé pour

valider le modèle développé sont illustrées dans le tableau 6.1. Ces valeurs sont prises des travaux de Janelle [108].

Tableau 6.1: Paramètres du vibro-compacteur-Modèle à 1-DDL [108].

Paramètres	Symboles	Valeurs
Masse totale	M_T	13766 kg
Rigidité	k_T	$4,90 \times 10^7$ N/m
Amortissement	b_T	15 750 N s/m
Temps	t	50 s
Vitesse	w	188,5 rad/s

6.2.2. Modèle à 1-DDL analytique

La solution de l'équation (6.1) est égale à la somme entre la solution sans le second membre (équation homogène) et la solution particulière de l'équation avec le second membre (réponse forcée) [105, 109]. La solution générale du système sous-amorti s'écrit comme suit :

$$x_{générale} = x_{homogène} + x_{particulière} \quad (6.4)$$

$$x_{générale} = A e^{-\xi w_n t} \cos(w_d t + \varphi) + X \cos(wt + \emptyset) \quad (6.5)$$

Les constantes A et φ sont établies par les conditions initiales du déplacement et de la vitesse [105]. Les différents paramètres de l'équation (6.5) sont définis comme suit :

ξ : le facteur d'amortissement.

X : le module.

\emptyset : l'argument.

w_n : la fréquence naturelle.

w_d : fréquence naturelle amortie.

w : fréquence d'excitation.

Les résultats obtenus sont indiqués à la figure 6.2 et à la figure 6.3 représentant respectivement les réponses temporelles libres avec le régime permanent et la réponse temporelle forcée. Le déplacement du vibro-compacteur obtenu en régime permanent est égal à $0,7 \times 10^{-3}$ m.

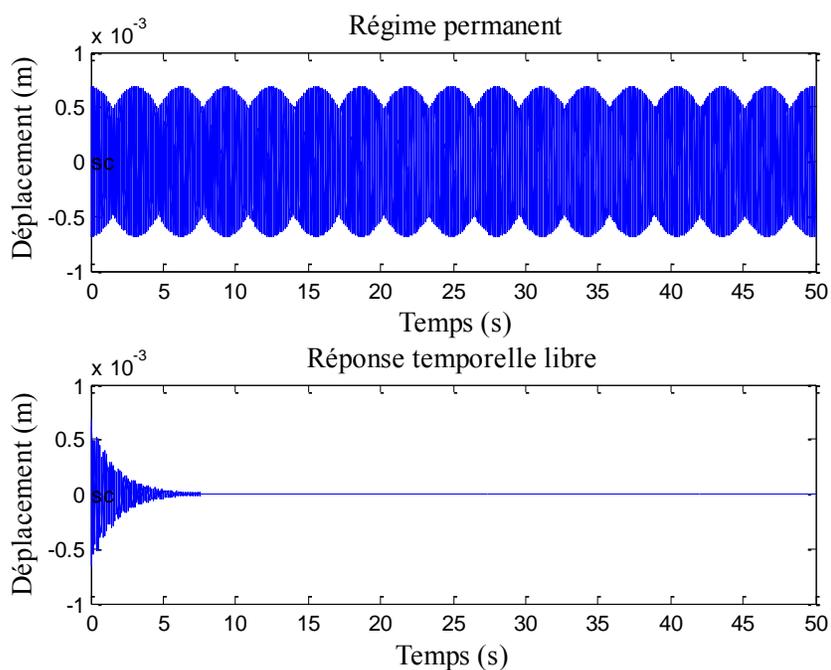


Figure 6.2 : Réponse temporelle libre et en régime permanent du vibro-compacteur-Matlab®.

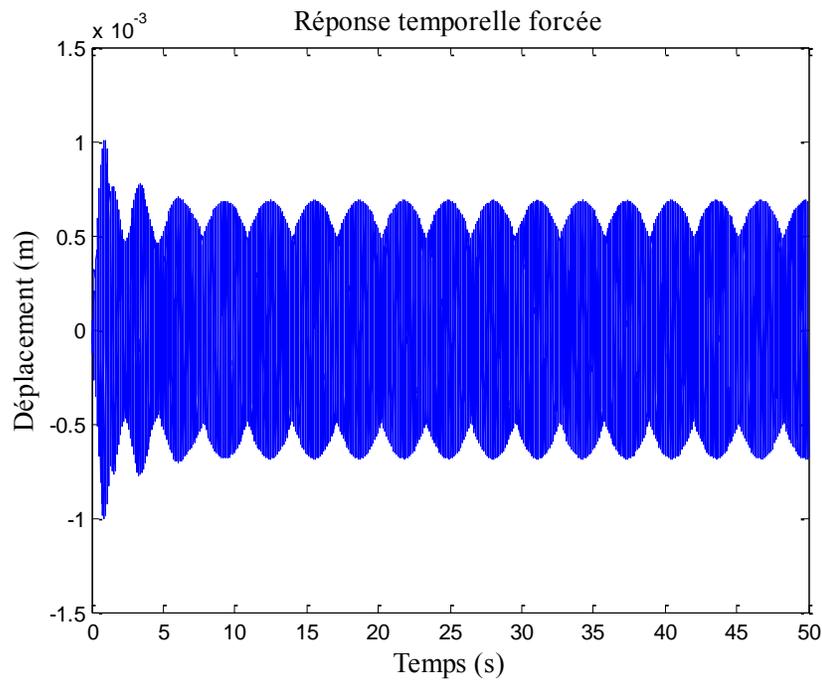


Figure 6.3 : Solution générale du déplacement du vibro-compacteur-Matlab®.

6.2.3. Modèle à 1-DDL sous Simulink

Il est nécessaire d'utiliser des techniques de calcul numérique pour obtenir une solution qui s'approche des équations du mouvement. Dans cette section, une deuxième approche est présentée reposant sur l'utilisation de l'interface Simulink [110, 111, 112]. Cette technique nécessite la construction d'un bloc schématique représentant les équations du mouvement. La figure 6.4 illustre le modèle dynamique modélisé sur l'interface Simulink.

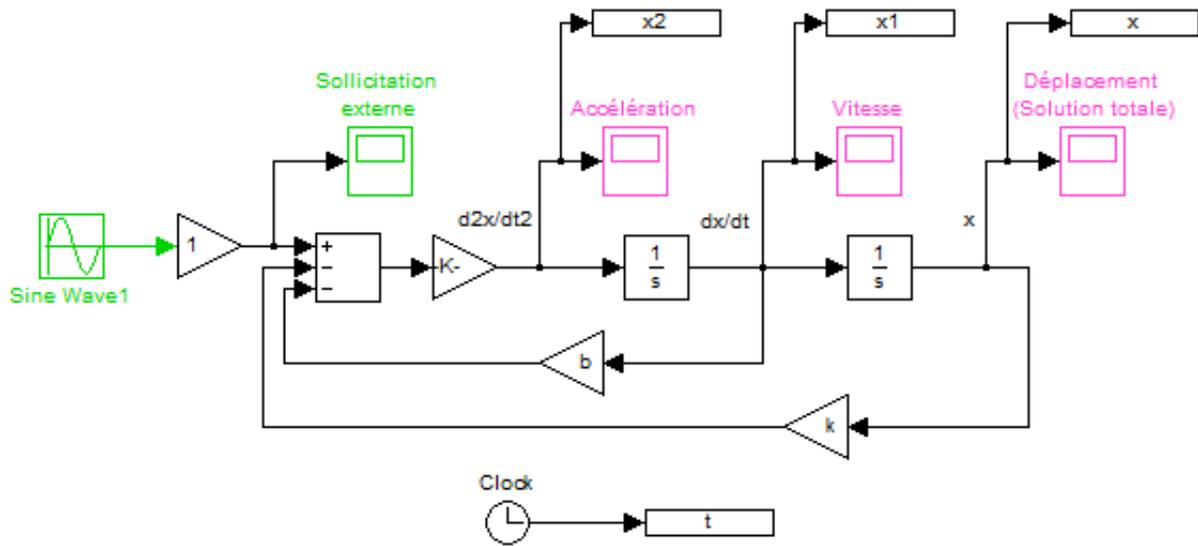


Figure 6.4 : Modèle Simulink à 1-DDL du vibro-compacteur.

Les résultats obtenus pour le déplacement et l'accélération du système à 1-DDL sont présentés respectivement à la figure 6.5 et à la figure 6.6.

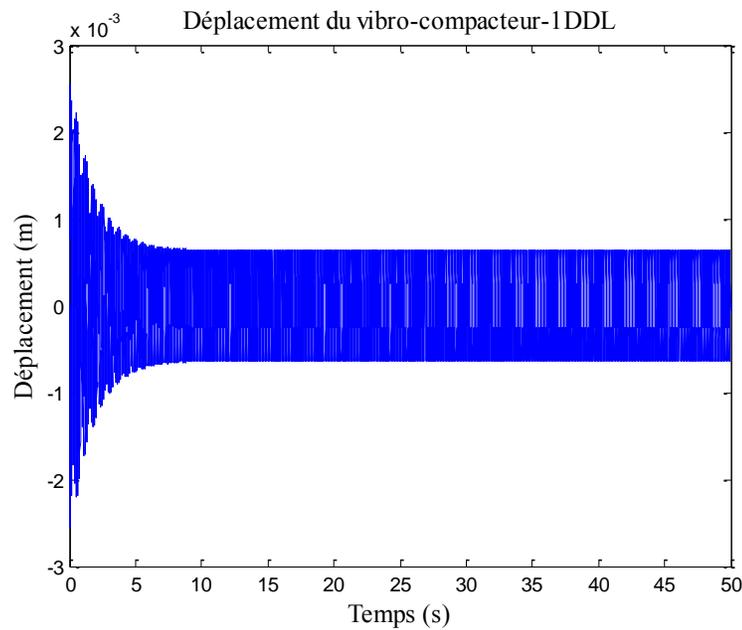


Figure 6.5 : Déplacement vertical du vibro-compacteur-Simulink.

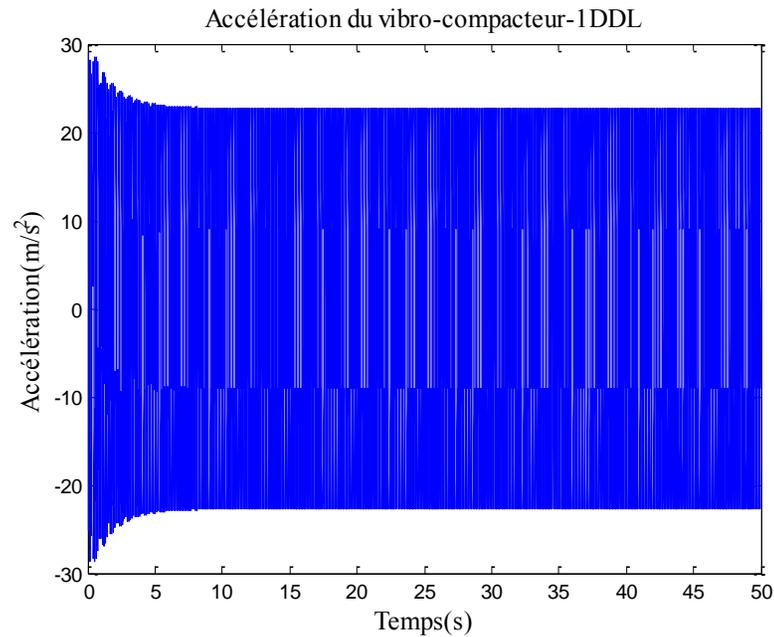


Figure 6.6 : Accélération du vibro-compacteur-Simulink.

Le déplacement du vibro-compacteur en régime permanent est égal à $0,7 \times 10^{-3}$ m comme pour le cas du déplacement obtenu avec le modèle programmé sous Matlab® ce qui valide cette approche. Ce modèle permet aussi d'avoir le graphe de l'accélération du système où dans ce cas d'étude l'accélération est égale à 22 m/s^2 en régime permanent ce qui équivaut à 2,24 g. Cette méthode numérique est beaucoup plus puissante, car elle permet de varier facilement plusieurs paramètres d'opération. Comme exemple, la courbe montrée à la figure 6.7 correspond à la variation de l'accélération en fonction de la vitesse d'opération de 10,5 à 209 rad/s [100 à 2000 RPM].

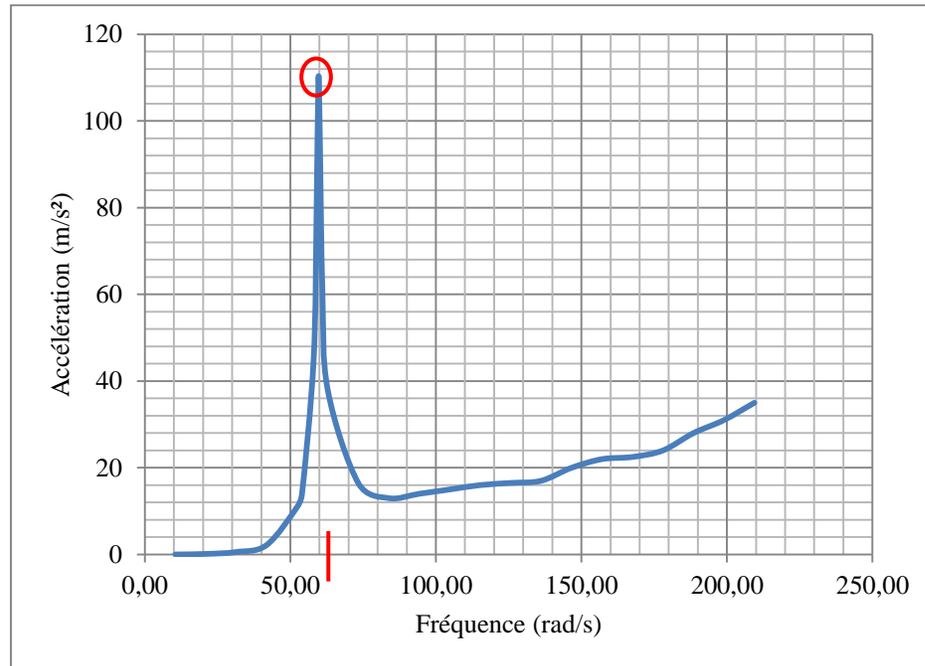


Figure 6.7 : Résonance du système.

La résonance du vibro-compacteur survient donc aux alentours de la fréquence de 59,7 rad/s (570 RPM) avec une accélération maximale de 110 m/s^2 . Il faut éviter d'opérer à cette fréquence de vibration sinon cela va causer le bris du système. Généralement, les fréquences naturelles des machines vibrantes varient entre 200 et 800 RPM, ce qui reflète bien les résultats obtenus dans notre cas d'étude. Donc, ce modèle à un degré de liberté (1-DDL) est bien plus facile et accessible à la simulation du mouvement d'un vibro-compacteur. C'est cette approche qui est utilisée pour le deuxième modèle du vibro-compacteur à deux degrés de liberté (2-DDL).

6.3. Modèle à 2-DDL

Dans la section précédente, un modèle à un degré de liberté 1-DDL simplifié du vibro-compacteur est présenté où tout le système est considéré comme étant une masse rigide. Donc, pour ce modèle à 1-DDL la réponse du système est une approximation. Maintenant dans le cas de ce deuxième modèle, la pâte de l'anode est considérée comme ayant une certaine rigidité mesurée expérimentalement au laboratoire de l'UQAC durant la fabrication des anodes. Lors du procédé de vibro-compaction, la pâte d'anode a tendance à se compacter. Donc, à changer de forme, ce qui signifie qu'elle n'a pas la même rigidité. Par conséquent, ce modèle à 2-DDL simule le déplacement de la table vibrante ainsi que celui de la pâte. C'est un modèle plus réaliste du fonctionnement du vibro-compacteur. La figure 6.8 montre le modèle à deux degrés de liberté 2-DDL en question.

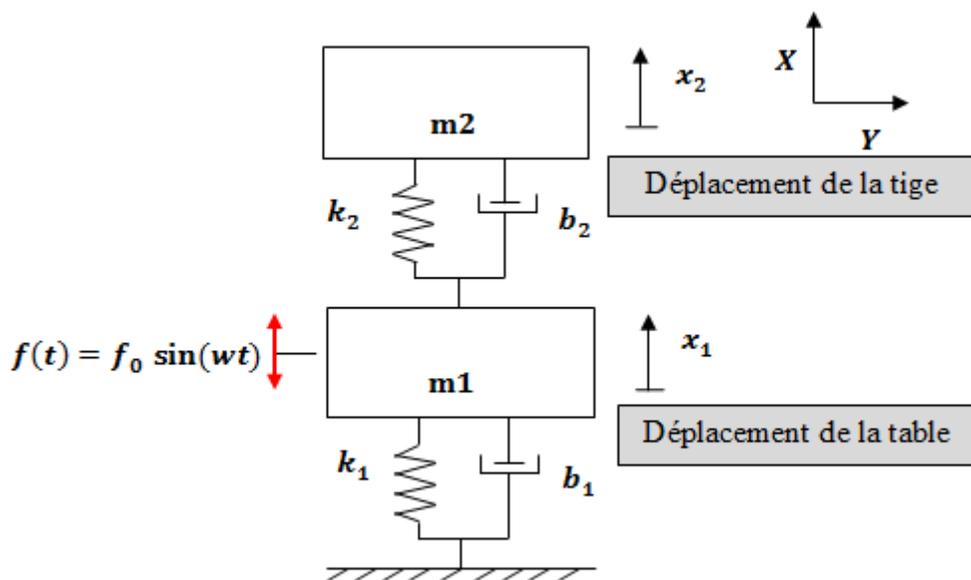


Figure 6.8 : Modèle à 2-DDL du vibro-compacteur.

La première masse du bas représente l'ensemble des masses de la table de vibration, du moule et de l'anode. La deuxième masse représente le couvercle, la tige guide et la pression de charge. Les paramètres du système sont les suivants :

$$m_1 = m_{table} + m_{moule} + m_{anode}.$$

$$m_2 = m_{pression\ de\ charge} + m_{couvercle\ et\ tige}.$$

k_1 : rigidité des isolations vibratoires.

b_1 : amortissement des isolations vibratoires.

k_2 : rigidité de la pâte.

b_2 : amortissement de la pâte.

x_1 : déplacement de la masse 1.

x_2 : déplacement de la masse 2.

6.3.1. Résolution mathématique du modèle à 2-DDL

Une représentation simplifiée du modèle à 2 DDL ainsi que la représentation du diagramme des corps libres sont respectivement illustrées à la figure 6.9 et à la figure 6.10.

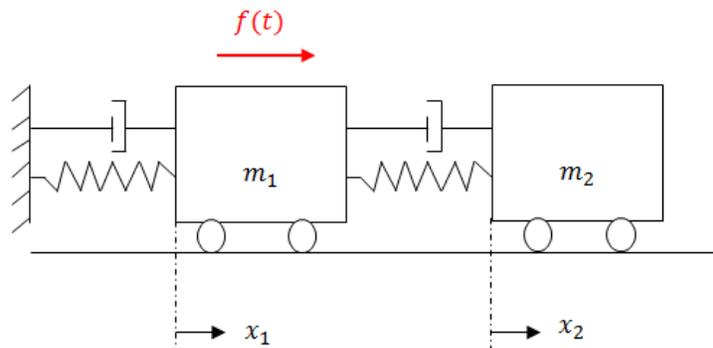


Figure 6.9 : Représentation simplifiée du modèle à 2-DDL.

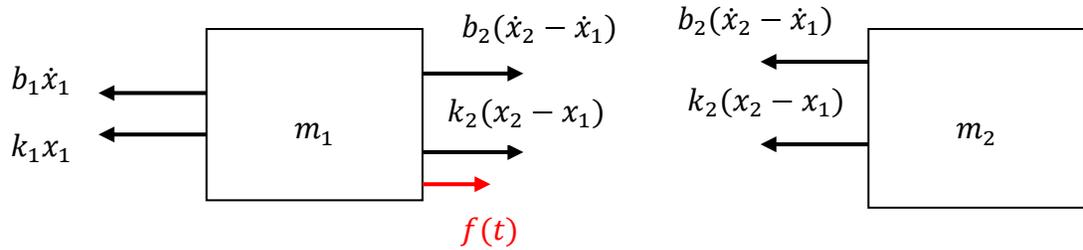


Figure 6.10 : Diagramme des corps libres du modèle à 2-DDL.

Avec :

$$-k_1x_1 + k_2(x_2 - x_1) - b_1\dot{x}_1 + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f(t) = m_1\ddot{x}_1 \quad (6.6)$$

$$-k_2(x_2 - x_1) - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = m_2\ddot{x}_2 \quad (6.7)$$

Après arrangement, le résultat suivant est obtenu :

$$m_1\ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2x_2 + (b_1 + b_2)\dot{x}_1 - b_2\dot{x}_2 = f(t) \quad (6.8)$$

$$m_2\ddot{x}_2 - k_2x_1 + k_2x_2 - b_2\dot{x}_1 + b_2\dot{x}_2 = 0 \quad (6.9)$$

6.3.2. Modèle à 2-DDL sous Simulink

La méthode de résolution analytique (section 6.2.2) est un outil puissant; cependant dans des cas plus complexes, il devient très laborieux de programmer tout un système complexe. Donc, dans le cas de ce système à 2-DDL, l'approche numérique sous l'interface Simuin a été utilisée. Les équations de ce système à 2-DDL sont présentées ci-dessous :

$$m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} + k_1x_1 + k_2x_1 - k_2x_2 + b_1 \frac{dx_1}{dt} + b_2 \frac{dx_1}{dt} - b_2 \frac{dx_2}{dt} = f(t) \quad (6.10)$$

$$m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} - k_2x_1 + k_2x_2 - b_2 \frac{dx_1}{dt} + b_2 \frac{dx_2}{dt} = 0 \quad (6.11)$$

Ce système d'équations devient comme suit :

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} = \frac{1}{m_1} \left(-k_1x_1 - k_2x_1 + k_2x_2 - b_1 \frac{dx_1}{dt} - b_2 \frac{dx_1}{dt} + b_2 \frac{dx_2}{dt} + f(t) \right) \quad (6.12)$$

$$\frac{d^2x_2}{dt^2} = \frac{1}{m_2} \left(k_2x_1 - k_2x_2 + b_2 \frac{dx_1}{dt} - b_2 \frac{dx_2}{dt} \right) \quad (6.13)$$

Donc, les équations du modèle à 2-DDL modélisées à l'aide de l'interface Simulink sont les suivantes :

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} = \frac{1}{m_1} \left(-(k_1 + k_2) x_1 + k_2x_2 - (b_1 + b_2) \frac{dx_1}{dt} + b_2 \frac{dx_2}{dt} + f(t) \right) \quad (6.14)$$

$$\frac{d^2x_2}{dt^2} = \frac{1}{m_2} \left(k_2x_1 - k_2x_2 + b_2 \frac{dx_1}{dt} - b_2 \frac{dx_2}{dt} \right) \quad (6.15)$$

La modélisation du système d'équations (6.14 et 6.15) sous l'interface Simulink est illustrée à la figure 6.11.

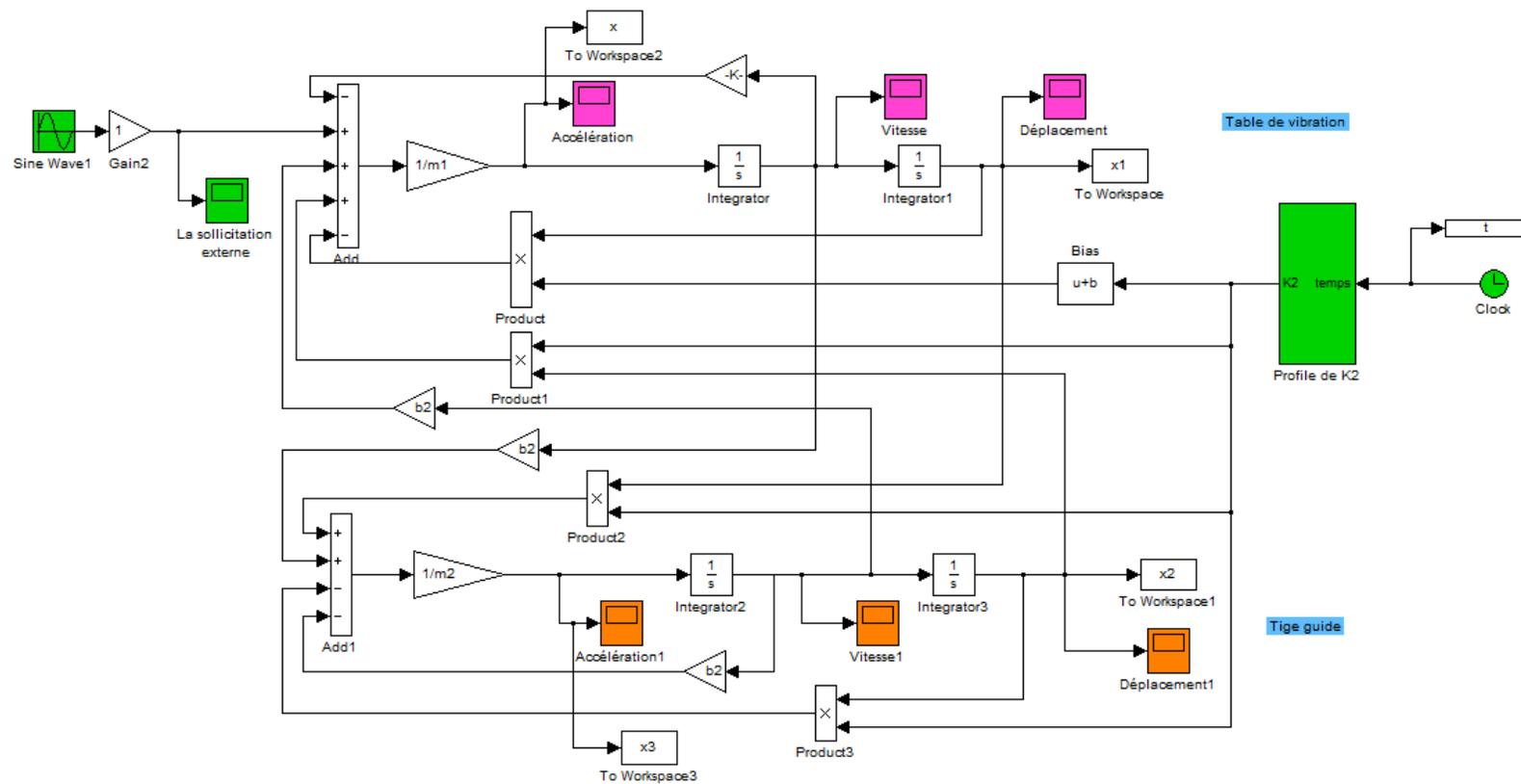


Figure 6.11: Modèle à 2-DDL sous Simulink.

6.3.3. Validation du modèle à 2-DDL

Une validation du modèle à 2-DDL développé sous l'interface Simulink est réalisée en utilisant les données du modèle dynamique de Janelle [108]. Les comparaisons des résultats des travaux de Janelle et de ceux obtenus par le modèle à 2-DDL développé sous Simulink dans le cadre de ce projet sont présentées dans cette section. Les paramètres qui sont utilisés durant cette validation sont présentés au tableau 6. 2. La rigidité de la pâte d'anode qui est prise durant les calculs est celle au début de la compaction.

Tableau 6. 2: Paramètres du vibro-compacteur-Modèle à 2-DDL [108].

Paramètres	Symboles	Valeurs
Masses (table, moule, anode)	m_1	6964 kg
Masse de la pression de charge	m_2	6802 kg
Rigidité des isolations vibratoires	k_1	$4,90 \times 10^7$ N/m
Rigidité de la pâte	k_2	$1,73 \times 10^8$ N/m
Amortissement des isolations vibratoires	b_1	15 750 N s/m
Amortissement de la pâte	b_2	$1,93 \times 10^5$ N s/m
Temps de vibration	t	10 s
Vitesse	w	205,8 rad/s

Les déplacements de l'ensemble table de vibration, moule et anode obtenue par Janelle sont présentés à la figure 6.12. Pour ce qui est du déplacement généré par la pression de charge (tige), le résultat obtenu est présenté à la figure 6.13. Maintenant, en utilisant le modèle développé sous l'interface Simulink, les résultats obtenus des déplacements de la masse 1 (ensemble table, moule et anode) et de la masse 2 (ensemble

tige, couvercle et pression de charge) sont respectivement présentés à la figure 6.14 et à la figure 6.15.

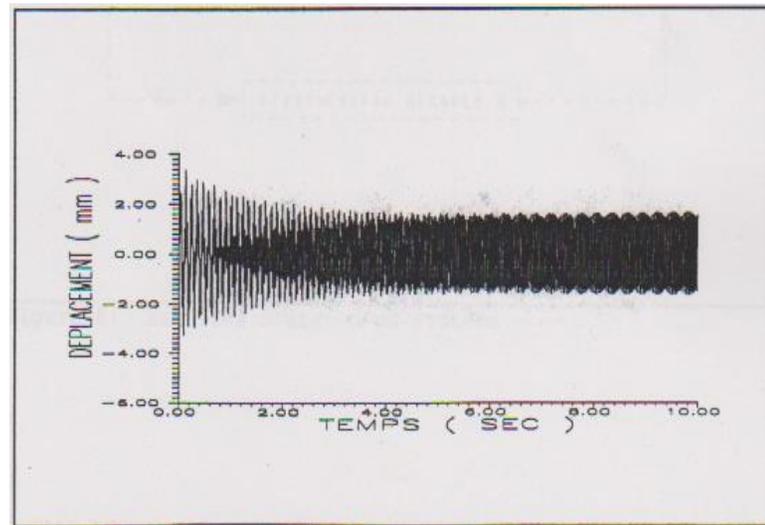


Figure 6.12 : Déplacement de la table (modèle littérature) [108].

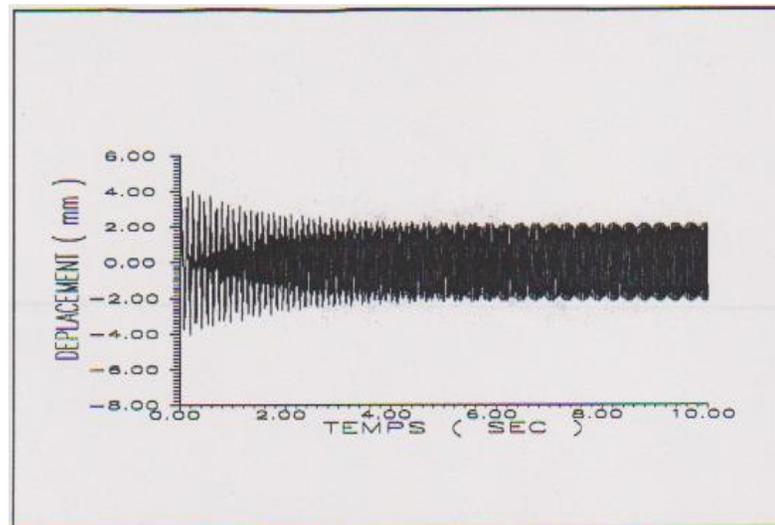


Figure 6.13 : Déplacement de la tige (modèle littérature) [108].

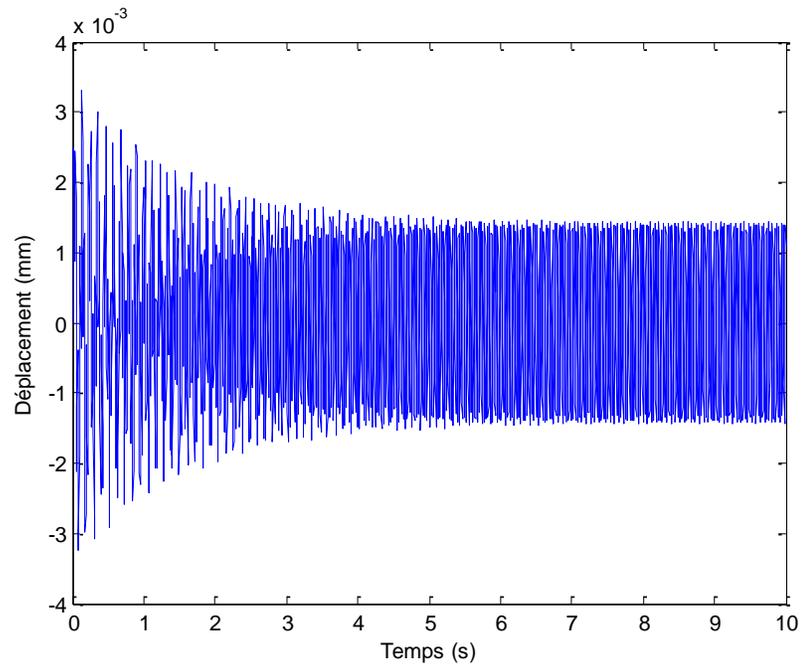


Figure 6.14 : Déplacement de la table (modèle Simulink).

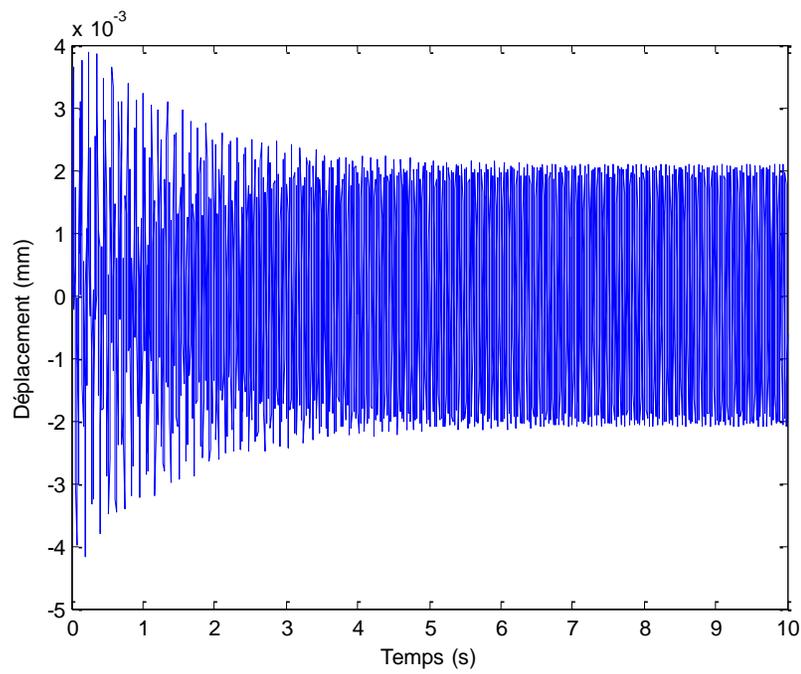


Figure 6.15 : Déplacement de la tige (modèle Simulink).

La comparaison entre les résultats obtenus dans le cas de l'étude faite par Janelle et dans le cadre de ce projet est similaire. Ce résultat valide bien le modèle à 2-DDL développé sous l'interface Simulink. Cependant, il se trouve un fait qu'il faut prendre en considération : le résultat obtenu par le modèle Janelle n'est pas réaliste car normalement la table de vibration devrait avoir un déplacement plus élevé comparé à celui de la tige. Les vibrations sont générées par les balourds qui sont entraînés en rotation par le moteur. Donc, c'est la table qui présente une vibration plus élevée comparée à la tige.

Pour résumer, ce modèle développé présente une interface de travail très conviviale. Il est adapté au cas du modèle à 2-DDL du vibro-compacteur ayant une rigidité de pâte variable qui est présenté dans la section suivante.

6.3.4. Rigidité de la pâte en échelon

Afin de pouvoir déterminer la rigidité de la pâte d'anode expérimentalement, un montage permettant de mesurer la variation de la rigidité de la pâte durant le procédé de vibro-compaction est installé. Des mesures de déplacement de la tige sont prises lors de la fabrication des anodes en laboratoire avec un LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) comme démontré à la figure 6.16. Cette mesure permet d'apprécier le déplacement de la tige en fonction du comportement de la pâte à la vibro compaction.

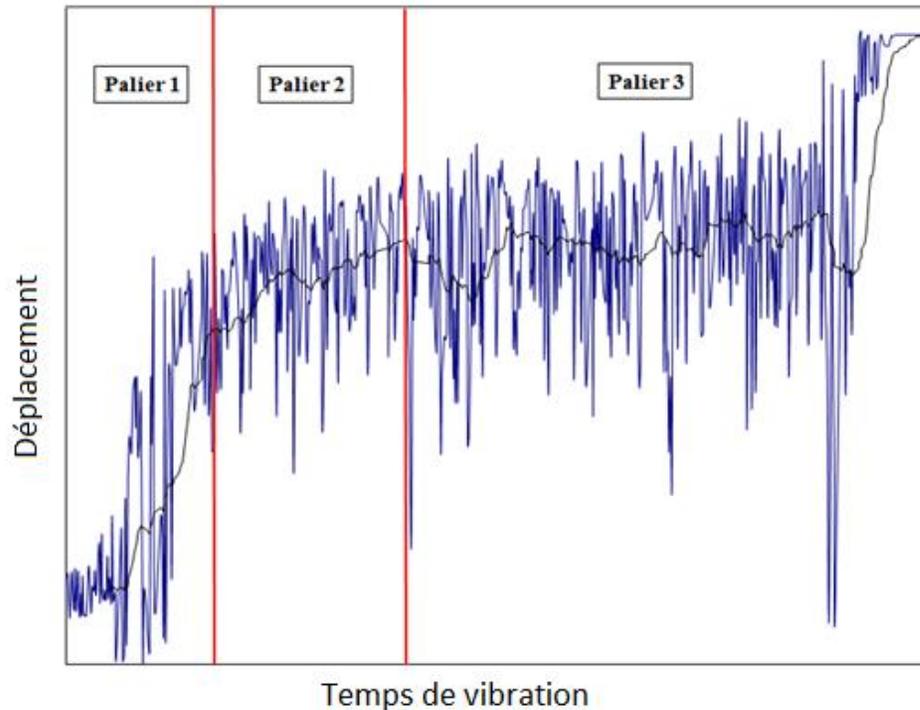


Figure 6.16 : Variation du déplacement de la tige durant la vibro-compaction de la pâte en fonction du temps.

Au début du procédé de vibro-compaction (palier 1), la pâte d'anode est bien plus malléable permettant ainsi une augmentation élevée au niveau du déplacement de la pâte. Donc, le déplacement enregistré est élevé. Par la suite au fur et à mesure que la pâte d'anode se compacte, les déplacements de la tige diminuent (paliers 2 et 3). Dans le cas de cette étude, la rigidité de la pâte est considérée variable selon trois paliers en fonction du temps de vibration comme présenté à la figure 6.16.

Les déplacements actuels dans les trois paliers sont calculés grâce au repère de référence mis lors de l'essai au niveau du système de charge du vibro-compacteur indiqué à la figure 6.17. Ce repère est pris avant et après vibro-compaction. La position de la

première référence est prise après avoir placé le système de charge sur la pâte d'anode et après avoir appliqué la pression de charge. La deuxième marque de référence est prise juste après la fin du procédé de vibro-compaction avant de soulever le système de charge.

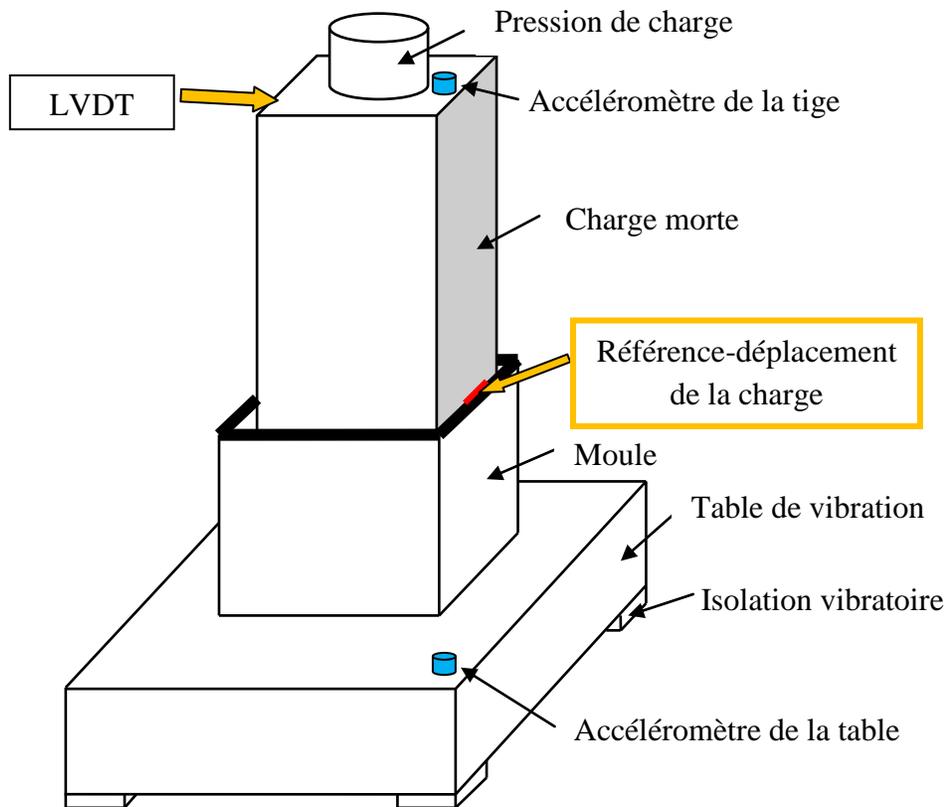


Figure 6.17 : Position de la référence du déplacement de la charge.

- **Détermination de la rigidité de la pâte**

Afin de pouvoir déterminer la rigidité de la pâte d'anode au niveau des différents paliers d'étude présentés à la figure 6.16, les calculs suivants ont été établit :

$$m_t a = k_t x \quad (6.16 a)$$

Avec :

m_t : charge morte et pression de charge.

a : accélération moyenne maximale.

k_t : rigidité de la pâte.

x : déplacement ou écrasement de la pâte.

En appliquant l'équation (6.16 a) pour le cas d'une rigidité variable avec le temps de vibration, le résultat obtenu est le suivant :

$$\begin{cases} m_t a = k_{21} x_1 \\ m_t a = k_{22} x_2 \\ m_t a = k_{23} x_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} k_{21} = \frac{m_t a}{x_1} & \text{(Palier 1)} \\ k_{22} = \frac{m_t a}{x_2} & \text{(Palier 2)} \\ k_{23} = \frac{m_t a}{x_3} & \text{(Palier 3)} \end{cases} \quad (6.17 \text{ b})$$

Une représentation schématique des positions des valeurs des déplacements de la pâte d'anode déterminée à partir des mesures du déplacement est présentée à la figure 6.18.

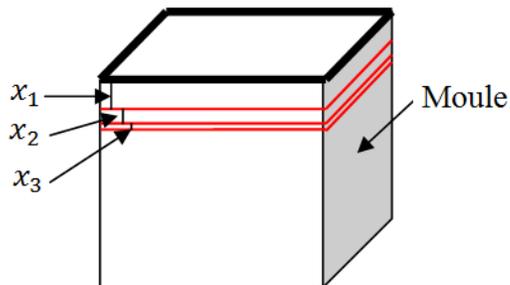


Figure 6.18 : Position des paliers de déplacement de la pâte.

Les valeurs de rigidité de la pâte d'anode obtenues à l'aide des mesures expérimentales ont été calculées en considérant durant les calculs une accélération maximale moyenne (régime permanent) de la table de vibration. Les résultats des différentes rigidités selon les trois paliers sont représentés au tableau 6.3. Ces résultats sont normalisés par rapport à la rigidité maximale obtenue. Les rigidités obtenues ont été

validées avec d'autres mesures de déplacement prises durant la fabrication d'autres anodes au laboratoire.

Tableau 6.3 : Valeurs expérimentales de la rigidité de la pâte d'anode en laboratoire.

Rigidités	Normalisation	Résultats en %
Rigidité de la pâte au temps T_1	$k_{T1} = \frac{k_{21}}{k_{23}}$	9,6 % de k_{23}
Rigidité de la pâte au temps T_2	$k_{T2} = \frac{k_{22}}{k_{23}}$	32,5 % de k_{23}
Rigidité de la pâte au temps T_3	$k_{T3} = k_{23}$	100 % de k_{23}

6.3.5. Modèle à 2-DDL-Vibro-compacteur industriel

Dans cette section, le modèle à 2-DDL est modélisé en utilisant les données industrielles. La rigidité de la pâte industrielle a été utilisée dans ce cas d'étude. Le déplacement ou l'écrasement maximal de la pâte d'anode (x de l'équation 6.16) a été évalué pour le vibro-compacteur industriel. Par la suite, les rigidités k_{21} , k_{22} et k_{23} ont été calculées pour le cas des anodes industrielles en se basant sur les rapports de pourcentage des rigidités de pâte obtenues en laboratoire (voir tableau 6.3). Les résultats des accélérations de la table de vibration avec la tige guide sont présentés pour trois cas de rigidité de pâte. Le premier cas représente la rigidité de la pâte d'anode au début du procédé de vibro-compaction. Au deuxième cas, la moyenne des rigidités des trois paliers a été considérée. Pour ce qui est du troisième cas, la rigidité du palier 3 a été utilisée. Les résultats sont normalisés par rapport aux valeurs maximales d'accélération obtenues expérimentalement au chapitre 3.

- **Rigidité de pâte (Palier 1)**

Dans cette section, la rigidité de la pâte d'anode au début du procédé de vibro-compaction a été considérée (c'est ce qui se fait au niveau de la littérature). Le tableau 6.4 présente les résultats des accélérations obtenus par le modèle à 2-DDL développé pour ce cas de rigidité de pâte.

Tableau 6.4 : Variation de l'accélération-Rigidité de pâte k_{21} .

	Accélération RMS (%)
Table	68,71
Tige	0,70

L'accélération de la table de vibration enregistrée est élevée comparée à celle de la tige, ce qui est normal. Ces résultats concordent bien avec ce qui est obtenu expérimentalement.

- **Rigidité de pâte (moyenne des trois paliers)**

Pour ce cas-ci, le tableau 6.5 présente les résultats des accélérations pour la moyenne des rigidités des trois paliers obtenus par le modèle à 2-DDL. Pareillement au premier cas, l'accélération de la table de vibration enregistrée est élevée comparée à celle de la tige. Par contre, ces résultats sont un peu plus élevés comparés au cas 1 car la rigidité de la pâte a augmenté. Le palier 1 représenté la plus faible rigidité de pâte.

Tableau 6.5 : Variation de l'accélération-Rigidité moyenne des trois paliers.

	Accélération RMS (%)
Table	74,78
Tige	4,35

- **Rigidité de pâte (Palier 3)**

C'est le cas du palier 3 de la figure 6.16 qui est présenté dans les résultats au tableau 6.6. Puisqu'au niveau des mesures industrielles, c'est à ce palier que les mesures d'accélération sont prises (régime permanent). Donc, c'est le cas le plus réaliste au niveau de cette comparaison.

Tableau 6.6 : Variation de l'accélération-Rigidité de pâte du palier 3.

	Accélération RMS (%)
Table	84,97
Tige	7,73

La comparaison entre les trois cas de rigidité de même que les mesures expérimentales sont présentés au tableau 6.7. En passant au troisième cas (rigidité du palier 3), les résultats des accélérations se sont plus rapprochés des résultats expérimentaux. Cependant, au niveau de l'accélération de la tige, c'est encore loin. Ce résultat a été amélioré en modélisant la rigidité des ballons du haut dans la section suivante.

Tableau 6.7 : Comparaison des accélérations RMS (Modèles à 2-DDL-Expérimentale)

	Accélération RMS (%)			
	Modèle à 2-DDL-Rigidité palier 1 (%)	Modèle à 2-DDL-Rigidité moyenne (%)	Modèle à 2-DDL-Rigidité palier 3 (%)	Expérimentale-Industrie (%)
Table	68,71	74,78	84,97	90,95
Tige	0,70	4,35	7,73	66,99

6.4. Modèle à 2-DDL optimisé

La comparaison des résultats présentés à la section 6.3.5 montrée que les accélérations de la tige du modèle à 2-DDL sont inférieure d'environ 88 % par rapport aux résultats obtenus expérimentalement. Cette différence au niveau des résultats a conduit à l'amélioration du modèle à 2-DDL développé. L'amélioration s'est faite au niveau des pressions de charge. Au lieu de prendre cette pression de charge comme étant une masse rigide, elle est modélisée comme ayant une rigidité. Par conséquent, la représentation qui se rapproche le plus de la réalité du modèle à 2-DDL du vibro-compacteur est montrée à la figure 6.19.

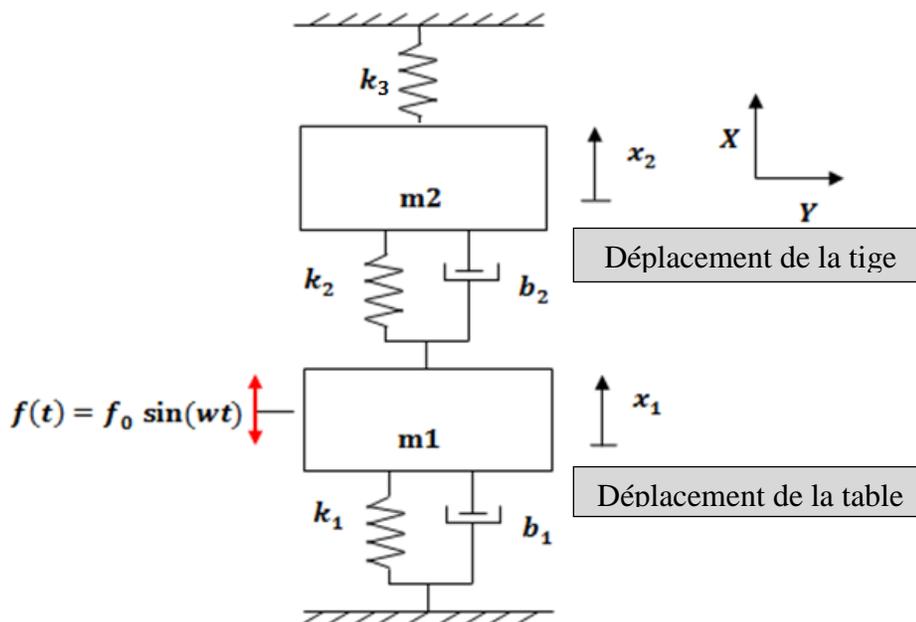


Figure 6.19 : Modèle à 2-DDL optimisé.

Les changements qui sont appliqués sont au niveau de la masse m_2 qui maintenant englobe la masse du couvercle et celui de la tige guide. La rigidité k_3 représente la pression des ballons de charge. Une représentation simplifiée du modèle à 2 DDL optimisé ainsi que

la représentation du diagramme des corps libres sont respectivement illustrés aux figure 6.20 et figure 6.21.

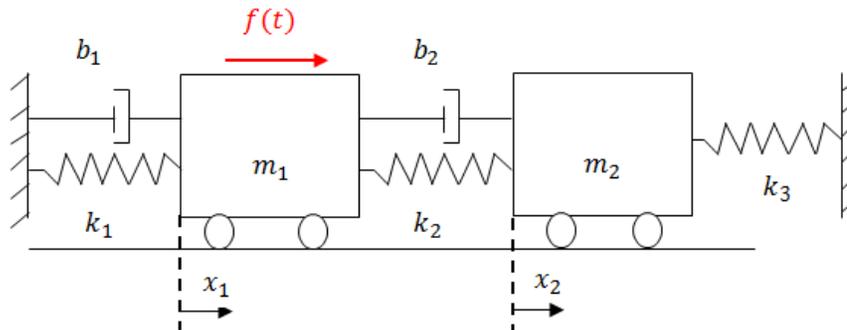


Figure 6.20 : Représentation simplifiée du modèle à 2-DDL optimisé.

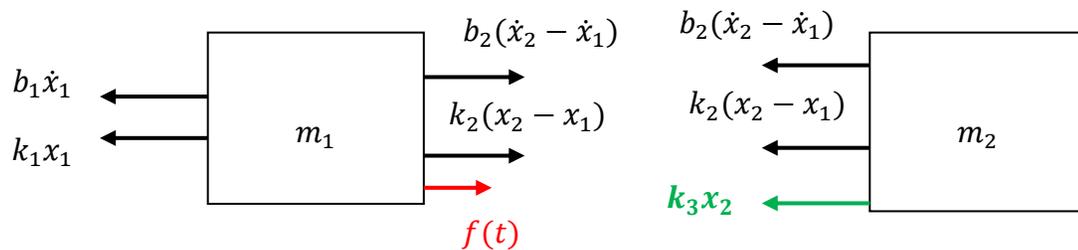


Figure 6.21 : Diagramme des corps libres du modèle à 2-DDL.

Avec :

$$-k_1x_1 + k_2(x_2 - x_1) - b_1\dot{x}_1 + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f(t) = m_1\ddot{x}_1 \quad (6.17)$$

$$-k_2(x_2 - x_1) - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_3x_2 = m_2\ddot{x}_2 \quad (6.18)$$

Au final, le système d'équations représenté sur Simulink est le suivant :

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} = \frac{1}{m_1} \left(-(k_1 + k_2)x_1 + k_2x_2 - (b_1 + b_2)\frac{dx_1}{dt} + b_2\frac{dx_2}{dt} + f(t) \right) \quad (6.19)$$

$$\frac{d^2x_2}{dt^2} = \frac{1}{m_2} \left(k_2x_1 - (k_2 + k_3)x_2 + b_2\frac{dx_1}{dt} - b_2\frac{dx_2}{dt} \right) \quad (6.20)$$

La modélisation du système d'équations (6.13) sous l'interface Simulink est illustrée à la figure 6.22.

La comparaison des résultats obtenus avec ce modèle à 2-DDL optimisé et ceux obtenus expérimentalement dans le cas des données industrielles sont présentés au tableau 6.8. C'est le cas de la rigidité du palier 3 de la figure 6.16 qui a été utilisé pour ces résultats. Maintenant, avec ce modèle optimisé, la différence entre les deux accélérations de la tige est passée de 88 % à 7 %. Donc, c'est une amélioration significative du résultat de l'accélération de la tige.

Tableau 6.8 : Comparaison des accélérations RMS (Modèles à 2-DDL optimisé-Expérimentale)

	Accélération RMS (%)	
	Modèle à 2-DDL-optimisé (%)	Expérimentale-Industrie (%)
Table	95,98	90,95
Tige	61,68	66,99

6.5. Conclusions

Les résultats obtenus durant les chapitres précédents ont permis de développer les modèles dynamiques du vibro-compacteur pour ce chapitre. Premièrement, un modèle simplifié du vibro-compacteur a été développé. Le vibro-compacteur est modélisé comme étant une masse rigide suspendue sur des ressorts et soumise à une excitation externe. Ce modèle est résolu en utilisant deux méthodes qui représentent la programmation de la solution des équations du mouvement sur Matlab® et la résolution du système d'équations à l'aide de schémas blocs sous l'interface Simulink. Les deux méthodes montrent des résultats similaires. Maintenant, pour ce qui est de l'interface Simulink, elle est plus conviviale en plus d'être très adaptée pour les cas de

systèmes complexes comme dans le cas du système à 2-DDL du vibro-compacteur. Les résultats de ce modèle à 1-DDL ont été publiés dans la conférence du TMS 2013 [2].

Une fois que l'approche de résolution de systèmes dynamiques à l'aide de Simulink est validée, le modèle à 2-DDL du vibro-compacteur est développé et résolu sous cette interface Simulink. En utilisant les résultats obtenus expérimentalement aux chapitres 3 et 5 de même que les données tirées de la littérature, le modèle à 2-DDL a été complété et validé.

Dans le cas de ce modèle à 2-DDL, la rigidité de la pâte d'anode a été prise en considération et elle a été mesurée expérimentalement en laboratoire. Les résultats obtenus montrent qu'au départ, la pâte d'anode est moins rigide, mais au fur et à mesure que le processus de vibro-compaction se complète, la pâte d'anode se rigidifie. C'est l'étude du cas de la rigidité du palier 3 qui été le plus réaliste au niveau de la comparaison avec les accélérations industrielles. Le modèle développé à 2-DDL, une fois optimisé, a démontré une amélioration significative au niveau de l'accélération de la tige comparée aux résultats expérimentaux.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1. Conclusions

Le projet de la Chaire de recherche industrielle UQAC/AAI est porté sur l'amélioration de la qualité des anodes en carbone utilisées pour la production de l'aluminium primaire. Durant la réalisation de ce projet de thèse, l'intérêt est porté au procédé de vibro-compaction qui est une étape très importante pour la fabrication des anodes. C'est à ce niveau que l'anode prend sa forme. Pour ce faire, l'influence de la variation des paramètres de vibro-compaction sur les propriétés physiques et mécaniques des anodes est étudiée en suivant une méthodologie de travail portée sur des mesures expérimentales en industrie. En laboratoire, la fabrication d'anodes en variant les paramètres de vibro-compaction a été réalisée ainsi que le développement des modèles dynamiques du vibro-compacteur.

Les résultats principaux obtenus durant cette étude sont énumérés dans les points suivants :

1. L'étude de la revue de littérature a démontré qu'il n'existe pas beaucoup de travaux reliant la théorie des modèles dynamiques de vibro-compacteurs à la pratique. Cette connexion est très importante, car elle permet de valider les développements de modèles théoriques à l'expérimentation. Les recherches au

niveau de la revue de littérature ont aussi démontré l'importance de la variation des différents paramètres du procédé de vibro-compaction sur la qualité des anodes produites.

2. Deux campagnes de caractérisation physique et mécanique des anodes crues industrielles sont réalisées à une année d'intervalle. Les plans de carottage de ces anodes sont établis en respectant la norme ASTM. L'étude des différentes normes d'essai mécanique applicable pour les anodes a permis d'établir une méthodologie ainsi qu'une procédure standard de caractérisation mécanique des anodes crues à température ambiante. Ce sont les tests de flexion à trois points et de compression uniaxiale qui sont réalisés selon les normes ASTM et ISO pour des fins de validation de la qualité des anodes crues. Pour ce qui est des propriétés physiques, les mesures de la densité apparente et de la résistivité électrique sont réalisées selon les normes ASTM.
3. En faisant les mesures de caractérisation physique et mécanique des quatre anodes crues de la campagne de 2011 formées le même jour avec la même recette de pâte et dans les mêmes conditions de fabrication, les résultats obtenus ont montré l'existence de certaines variations entre les cartographiques des propriétés de chacune de ces anodes. Ces différences entre les anodes formées avec le même matériel ont conduit à faire une deuxième campagne de caractérisation physique et mécanique des anodes industrielles à l'état crues,

mais cette fois-ci en prenant des mesures d'accélération lors de la fabrication de ces anodes.

4. L'état mécanique des vibro-compacteurs influe considérablement sur les propriétés physiques et mécaniques des anodes formées. Ce sont les mesures d'accélération qui permettent de diagnostiquer l'état de fonctionnement de ces machines.
5. Durant la campagne de 2012, l'impact de la diminution de sept secondes du temps de vibro-compaction a été évalué. Les résultats montrent que dans le cas des anodes crues, statistiquement il n'existe pas de différence entre les anodes formées aux deux temps de vibration T1 et T2.
6. Une autre comparaison est aussi réalisée au niveau de ces huit anodes de la campagne de 2012. C'est au niveau des échantillons qui sont situés en haut et en bas de l'anode. Les résultats obtenus montrent que les propriétés physiques et mécaniques des échantillons qui sont situés en bas de l'anode sont faibles par rapport à ceux situés en haut de l'anode. Ces résultats s'appliquent pour tous les vibro-compacteurs testés, quels que soient les paramètres d'opération ainsi que les matières premières utilisées. Cette différence de propriétés est plus prononcée dans le cas des anodes provenant des vibro-compacteurs C et D.
7. D'un autre côté, l'analyse des mesures d'accélération prises durant cette campagne montre qu'au niveau de ces deux vibro-compacteurs C et D, il existe un écart élevé entre l'accélération de la table et celle de la tige. Cet écart peut-

être dû à l'ajustement au niveau des pressions de charge de même qu'au niveau des isolations vibratoires causant ainsi des pertes d'énergie. L'analyse de ces mesures vibratoires montre aussi des variations entre les accélérations des coins des tables des vibro-compacteurs. Cette variation peut être due à l'arrangement du vibro-compacteur (balourds, alignement). Elle peut aussi être due à la manière dont la pâte est versée dans le moule (différentes formes). L'exemple du vibro-compacteur B présentant une accélération élevée pour un coin de table a conduit à la fissuration de cette dernière. Donc, les mesures d'accélérations sont très importantes afin de diagnostiquer et de prévenir des situations comme celles-ci. Une évaluation est en cours en usine pour améliorer la performance des vibro-compacteurs.

8. Des séries de calibration du système de charge, des vitesses de vibrations et des dimensions du moule sont réalisées sur le vibro-compacteur du laboratoire afin de produire des anodes possédant des propriétés qui se rapprochent à celles des anodes industrielles.
9. Des équipements de mesures vibratoires au niveau du laboratoire ont été acquis et calibrés. Par la suite, ces équipements sont utilisés pour développer une méthodologie ainsi qu'une procédure de vérification et de diagnostic en continu du vibro-compacteur du laboratoire avant et après chaque fabrication des anodes et même durant la fabrication des anodes.

10. Les cartographies de la table de vibration réalisées au laboratoire en utilisant les mesures d'accélération ont dévoilé l'existence de certains problèmes au niveau du montage qui par la suite a été résolu. Ces problèmes se situent principalement du côté de l'alignement de la table de vibration avec l'arbre du moteur, la fonte des cages en plastiques des guides linéaires et la mise à niveau de la table de vibration.
11. Afin de pouvoir trouver les plages d'opération pour les paramètres tels que la vitesse de vibration et le déplacement des excentriques du vibro-compacteur du laboratoire, des séries de mesures d'accélération sur la table de vibration à vide sont réalisées en variant ces paramètres. Les résultats obtenus montrent qu'en augmentant le déplacement et la vitesse de vibration, l'accélération de la table augmente elle aussi. Arrivée à un certain niveau de vitesse et de déplacement élevé, l'accélération de la table augmente de plus en plus en intensité. Donc, il ne faut pas opérer au niveau de ces vitesses et déplacements élevés, car ce fait peut conduire à la destruction du montage.
12. D'un autre côté, la comparaison des résultats d'accélération du vibro-compacteur du laboratoire obtenus analytiquement avec ceux obtenus expérimentalement montre une certaine similitude. Donc, la méthode de calcul analytique est en soit un outil très intéressant qui permet de prédire l'accélération d'un vibro-compacteur.

13. Les caractérisations physiques et mécaniques des anodes du laboratoire montrent qu'avec l'augmentation de la vitesse, du déplacement, du temps, de la charge et de la pression de charge; la qualité des anodes produites s'améliore. C'est au niveau de la densité que l'augmentation était la plus importante. Ces paramètres sont ajustables selon les capacités des équipements et aussi selon la qualité des anodes souhaitée. Lorsque ces paramètres sont trop augmentés, ils pourraient créer la formation de fissures prématurées et aussi le bris de certaines particules.
14. Les résultats obtenus du modèle à 2-DDL (modèle optimisé) développé en utilisant Simulink se rapprochent bien des résultats expérimentaux. Ce modèle reflète bien ce qui se passe au niveau des mécanismes de fonctionnement des vibro-compacteurs. Cet outil va permettre de simuler différents cas d'études selon des conditions initiales sans avoir recours à faire des essais expérimentaux.

Enfin, les objectifs qui ont été fixés à la section 1.3 du chapitre 1 de ce projet ont été atteints avec succès. La portée de ce projet est déjà applicable à un nombre important d'applications industrielles. En résumé, ce travail a porté sur une étude systématique de l'influence des paramètres de vibro-compaction sur la qualité des anodes crues que ce soit en laboratoire ou à l'échelle industrielle. Il a permis de mieux comprendre le fonctionnement des vibro-compacteurs et ainsi de les diagnostiquer. Ce qui sort aussi de ce travail original c'est le modèle à deux degrés de liberté optimisé du vibro-compacteur permettant de simuler au mieux le comportement dynamique de ces machines de mêmes que les accélérations qui sont générées.

7.2. Recommandations

Dans cette section, une série de recommandations pour des travaux futurs sont établies et énumérées ci-dessous :

1. Effectuer des mesures d'accélération pour différentes valeurs de pressions de charge des amortissements de la table de vibration et au niveau des pressions de charge du haut du moule afin de pouvoir synchroniser les vibrations de la table avec la tige guide. Une autre chose aussi qui peut améliorer les résultats, c'est de travailler sur les mesures de phase. Il faut aussi travailler sur la réduction du jeu entre les pièces mécaniques du vibro-compacteur afin de prolonger la durée de vie des équipements.
2. Du côté des ballons de charge, il est recommandé de garder le même fournisseur ou la même catégorie de ballons pour la série placée sur le vibro-compacteur. Il ne faut pas varier la pression de charge juste pour augmenter la densité, car cette dernière joue aussi un rôle important dans la synchronisation de la vibration de table avec la tige du vibro-compacteur.
3. Équiper les vibro-compacteurs d'accéléromètres pour des mesures vibratoires en continu et vérifier les mises à niveau des tables de vibration afin de prévenir des bris majeurs au niveau des équipements et ainsi de mieux contrôler la production au niveau des anodes. Lorsqu'il y'a un changement majeur au niveau d'un vibro-compacteur, il va falloir prendre des mesures vibratoires pour savoir si le tout est

bien revenu à l'état initial dans le cas où le vibro-compacteur en question n'est pas équipé de dispositif de mesures vibratoires en continu.

4. Afin d'éviter d'avoir des propriétés variables sur les côtés des trous de formage des anodes, il est recommandé de faire une mise à niveau de la pâte d'anode avant vibro-compaction où de faire vibrer la table de vibration quelques secondes avant de baisser le couvercle. Pour les anodes formées au temps de vibration réduite, avant tout il faut regarder les défauts après cuisson. Par la suite, il faut faire un suivi au niveau de la consommation de ces dernières au niveau des cuves d'électrolyse.
5. Faire des mesures de rigidité de la pâte d'anode pour des matières premières variables afin de déterminer une équation générale de la rigidité de la pâte d'anode. Il est recommandé aussi de réaliser d'autres tests de caractérisation des propriétés de la pâte d'anode durant le procédé de vibro-compaction afin d'améliorer les résultats obtenus au niveau des accélérations de la tige guide du modèle à 2-DDL.
6. Faire un suivi des résultats de cette étude portant sur les anodes crues après cuisson des anodes et aussi au niveau de la consommation des anodes au niveau des cuves d'électrolyse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: F. Rebaïne, M. Bouazara, D. Marceau, D. Kocafe, B. Morais and C. L. Lagacé, « Physical and mechanical characterizations of carbon anodes produced from different vibro-compactors », *Conference of Metallurgists COM*, 2013.
- [2]: F. Rebaïne, M. Bouazara, D. Marceau, D. Kocafe and B. Morais, « Development of an analytical dynamic model of a vibro-compactor used in carbon anode production », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2013, p. 1111-1115.
- [3]: F. Rebaïne, M. Bouazara, D. Marceau, D. Kocafe and B. Morais, « Influence des paramètres du procédé de vibro-compaction sur la production des anodes de carbone », *81e Congrès de l'Acfas*, 2013.
- [4] : F. Rebaïne, M. Bouazara, D. Marceau, D. Kocafe and B. Morais, *Effet de la variation des paramètres de vibro-compaction*, JER-REGAL, PRAC, Les presses de l'aluminium, Université de Sherbrooke, 2014.
- [5]: F. Rebaïne, M. Bouazara, D. Marceau, D. Kocafe and B. Morais, *Caractérisation physique et mécanique des anodes crues en 3-D* , JER-REGAL, PRAC, Les presses de l'aluminium, Palais des congrès de Montréal, 2013.
- [6]: F. Rebaïne, M. Bouazara, D. Marceau, D. Kocafe and B. Morais, *Développement d'un modèle analytique de vibro-compacteur utilisé pour la production des anodes de carbone* , JER-REGAL, PRAC, Les presses de l'aluminium, Cégep de Trois-Rivières, 2012, page 35.
- [7]: K. Azari, M. Fafard, H. D. Alamdari and D. Zeigler « Optimisation des matières premières et du procédé de fabrication des anodes », JER 2009, page 12.
- [8]: F. Keller, U. Mannweiler and E. Knall, «Constructing and operating anode plants: what top management needs to know », R&D carbon Ltd (anode for the aluminum industry), 2007, p. 217-224.
- [9]: S. Sanku International Trading Co and Ltd, «broken prebaked carbon anode/ metallurgical coke», 2012, from http://trade.e-to-china.com/companycEADBA/Shanxi_Sanku_International_Trading.html
- [10]: M. Beilstein and M. Spangehl, «Vibro-compacting machines for the moulding of green anodes-process development from the equipment supplier's point of view », *Light Metals*, 1998, p. 745-752.

-
- [11]: L. R&D Services Precision, « Performance Efficiency, The perfect Press for any Application », 2010, from http://www.laeis-gmbh.com/System/00/01/97/19745/634595451091143442_1.pdf
- [12]: A. Pinoncely, « Reliable high density anode forming with Xelios », Solios Carbone – France, 2009, www.aluminiumtoday.com
- [13] : N. E. Saue, J. O. Ystgaard, J. I. Johannessen, M. W. Meier and R. C. Perruchoud, « Improvement of Anode Paste Quality and Performance of ALCOA Lista », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2012, p. 1159-1163.
- [14] : T. Vidvei and R. Pedersen , « Laboratory and full scale experiments to improve quality of the VS SØderberg secondary anode », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2004, p. 523-526.
- [15] : C. Vanvoren, « *Recent Improvement in Paste Plant Design: Industrial Application and Results* », *TMS Light Metal*, 1987, p. 358-364.
- [16] : R. Garg, D. Sulaiman and M. Toorani, « Baked Anode Quality Improvement through Optimization of Green Anode Plant Ultra-Fine Content in Ball Mill Product and Process Parameters », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2012, p. 1169-1172.
- [17] : B. A. Sadler, « Diagnosing anode quality problems using optical macroscopy », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2012, p. 1289-1292.
- [18]: M. W. Meier, *Cracking behaviour of anodes*, R&D Carbon Ltd, 1996, 364 pages.
- [19]: D. H. Andersen and Z. Zhang, *Fracture of anode carbon materials in aluminum production*, poster, NTNU, 2009, 1 page.
- [20]: O. E. Frosta, T. Foosnæs, H. A. Øye and H. Linga, « Modelling of anode thermal cracking behavior », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2008, p. 923-227.
- [21]: N. A. Ambenne, « Vertical anode cracking- The Valco experience », *TMS Light Metals*, 1997, p. 577-583.
- [22]: H. Aasen, *Finite Element Analysis of Anode Cracking*, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2007, 64 pages.

-
- [23] : W. K. Fischer, M. W. Meier and M. W. Lustenberger, « Cooling of green anodes after forming », *TMS Light Metal*, 1999, p. 351-357.
- [24] : Ø. Gundersen, *Modelling of Structure and properties of soft carbons with application to carbon anode baking*, PHD Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 1998, 581 pages.
- [25]: Rio Tinto Alcan, *Procédé de fabrication des anodes*, Projet de construction de l'usine AP50 du complexe Jonquière à Saguenay par Rio Tinto Alcan inc.
http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/ap50_rio_tinto_alcan/documents/DA4.pdf
- [26]: International Standard, *ISO 12986-1:2000, Carbonaceous materials used in the production of aluminium -- Prebaked anodes and cathode blocks -- Part 1: Determination of bending/shear strength by a three-point method*, 2000, 7 pages.
- [27]: An American National Standard, *ASTM C695-91 (Reapproved 2005), Standard test method for compressive strength of carbon and graphite*, 2010, p. 211-213.
- [28]: International Standard, *ISO 18515:2007(E), Carbonaceous materials for the production of aluminium -Cathode blocks and baked anodes -Determination of compressive strength*, 2007, 4 pages.
- [29]: An American National Standard, *ASTM D5502-00 (Reapproved 2005), Standard test method for apparent density by physical measurements of manufactured anode and cathode carbon used by the aluminum industry*, 2010, p. 1225-1227.
- [30]: An American National Standard, *ASTM D6120-97 (Reapproved 2007), Standard test method for electrical resistivity of anode and cathode carbon material at room temperature*, 2010, p. 320-322.
- [31] : An American National Standard, *ASTM D6353-06, Standard guide for sampling and core sampling for prebaked anodes used in aluminum production*, 2010, p. 620-623.
- [32]: R. W. Peterson, « Aggregate optimization using a Y-Blender », *TMS Light Metal*, 1982, p. 307-312.
- [33] : Les Edwards, « Quality and process performance of rotary kilns and shaft calciners », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2011, p. 24-29.
- [34] : U. Mannweiler, D. Rodriguez, W. S. Hatting and A. Maitland, « High Vanadium Venezuelan Petroleum Coke, A Rawmaterial for the Aluminum Industry?», *TMS Light Metal*, 1989, p. 30-35.

-
- [35] : P. J. Rhedey and S.K. Nadkarni, « Carbon raw material effects on aluminum reduction cell anodes », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 1986, p. 53-58.
- [36] : S. Wilkening, « Maintaining consistent anode density using varying carbon raw materials », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2009, p. 156-162.
- [37] : B. Majidi, K. Azari, H. Alamdari, M. Fafard and D. Ziegler, « Discrete element method applied to the vibration process of coke particles », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2012, p. 1273-1277.
- [38] : J. Patrick, *The influence of pitch quality on anode carbon gasification*, Luxembourg, European Commission, 1998, 44 pages.
- [39] : R. C. Perruchoud, M. W. Meier and W. Fischer, « Worldwide Pitch Quality for Prebaked Anodes », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2003, p. 167-176.
- [40] : J. T. Baron, S. A. McKinney and R. H. Wombles, « Coal Tar Pitch - Past, Present, and Future », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2009, p. 177-181.
- [41] : K. Azari, H. Ammar, H. D. Alamdari and M. Fafard, *Les effets de la formulation de l'anode et des caractéristiques des particules sur la conception de la pâte*, JER-REGAL, PRAC, Les presses de l'aluminium, Québec, Canada, 2010, page 14.
- [42] : X. Haifei, F. Lijun, Z. Yang, S. Yi and C. Yinhe, « Baked anode quality improvement through optimization of green anode processing », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2012, p. 1165-1167.
- [43] : R. J. Akhtar, S. A. Rabba and M. W. Meier, « Dynamic process optimization in paste plant », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2006, p. 571-575.
- [44] : S. Wilkening, « Potentialities in the paste plant », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 1997, p. 378-385.
- [45] : P. Stokka and I. Skogland, « SØderberg paste. effect of fine fraction variations », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 1990, p. 313-317.

-
- [46] : L. P. Lossius, M. Lubin, Les Edwards and J. Wyss, « Relationships between coke properties and anode properties », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2013, p. 1183-1188.
- [47] : Y. Xie, D. Kocaefe, Y. Kocaefe, L. Wei, S. Zou and A. Wu, « Correlation between anodes recipe and anode properties », *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Volume 2, Issue 8, 2013, p. 23-27.
- [48] : K. Khajji and H. Abbas « Baked anode density improvement through optimization of green anode dry aggregate composition », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2010, p. 1027-1030.
- [49] : U. Bühler and R. C. Perruchoud, « Dynamic process optimization », *TMS Light Metal*, 1995, p. 707-714.
- [50] : M. C. Vaillancourt, G. Dufour, M. Gendron, D. Maxwell, M. Gasse, J. P. Gagné and N. Foster, *Système d'inspection automatisée des mégots d'anodes : Classification des défauts*, JER-REGAL, PRAC, Les presses de l'aluminium, Québec, Canada, 2007, page 19.
- [51] : S. Yi, G. huai, Z. Shanhong, L. Chaodong and X. Haifei, « Compaction of mixing process methods in prebaked anode production », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2013, p. 1127-1130.
- [52] : D. Belitskus, « Effects of mixing variables and mold temperature on prebaked anode quality », *TMS Light Metal*, 1985, p. 328-332.
- [53] : M. W. Meier and R. C. Perruchoud, « Paste production and its performance in sØderberg smelters », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2014, p. 1203-1208.
- [54] : B. Hohl, A. Pinoncely and J. C. Thomas, « Anode paste preparation by means of a continuously operated extensive mixing cascade at aostar qimingxin aluminium china », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2004, p. 511-515.
- [55] : K. L. Hulse, R. C. Perruchoud, W. K. Fischer and B. J. Welch, « Process adaptations for finer dust formulations : Mixing and Forming », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2000, p. 467-472.
- [56] : K. Azari, B. Majidi, H. Alamdari, D. Ziegler and M. Fafard, « Characterization of homogeneity of green anodes through X-RAY tomography and image analysis », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2014, p. 1141-1146.

-
- [57] : K. Azari, H. Alamdari, G. Aryanpour, D. Picard, M. Fafard and A. Adams, « Mixing variables for prebaked anodes used in aluminum production », *Powder Technology*, 235, 2013, p. 341–348.
- [58] : D. Picard, H. Alamdari, D. Ziegler, B. Dumas and M. Fafard, « Characterization of pre-baked carbon Anode Samples using X-Ray computed tomography and porosity estimation », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2012, p. 1283-1288.
- [59] : H. Chaouki, S. Thibodeau, H. Alamdari, D. Ziegler and M. Fafard, « Viscoplastic modeling of the green anode forming process », 2014, *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2014, p. 1135-1139.
- [60] : S. Thibodeau, H. Chaouki, H. Alamdari, D. Ziegler and M. Fafard « High temperature compression test to determine the anode paste mechanical properties », 2014, *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2014, p. 1129-1134.
- [61] : S. Thibodeau, H. Alamdari, D. P. Ziegler and M. Fafard, « New insight on the restructuring and breakage of particles during uniaxial confined compression test on aggregates of petroleum coke », *Powder Technology*, 253, 2014, p. 757–768.
- [62] : J. L. Gauthier, C. Duchesne and J. Tessier, « Texture analysis of anode paste image », 2014, *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2014, p. 1123-1128.
- [63] : K. Azari, H. Alamdari, D. Ziegler and M. Fafard, « Influence of coke particle characteristics on the compaction properties of carbon material paste », *Powder Technology*, 257, 2014, p. 132–140.
- [64] : K. Azari, H. Ammar, H. Alamdari, D. Picard, M. Fafard and D. Ziegler, « Effects of physical properties of anode raw materials on the paste compaction behavior », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2011, p. 1161-1164.
- [65] : G. R. Aryanpour, H. D. Alamdari, K. Azari, D. Ziegler, D. Picard and M. Fafard, « Analysis on the die compaction of anode paste material used in aluminum production plants », *Powder Technology*, 254, 2014, p. 228–234.
- [66] : K. Azari, H. Alamdari, G. Aryanpour, D. Ziegler, D. Picard and M. Fafard, « Compaction properties of carbon materials used for prebaked anodes in aluminum production plants », *Powder Technology*, 246, 2013, p. 650–657.

-
- [67] : P. O. St-Arnaud, D. Picard, M. Noël, H. Alamdari, D. Ziegler and M. Fafard, « New compaction method for the production of the large ramming paste samples », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2013, p. 1233-1238.
- [68] : O. Bowitz, T. Eftestol and R. A. Selvik, « New Methods for Testing Raw Materials for Anode Carbon Paste », *TMS Light Metal (Extractive Metallurgy of Aluminum)*, 1963, p. 271-280.
- [69] : Z. Qingcai, Z. Jingli, Z. Qingbo and J. Aohai, « Study of manufacturing technology for high quality anodes », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2014, p. 1209-1212.
- [70] K. L. Hulse, *Anode Manufacture: Raw Materials, Formulation and Processing Parameters*, Sierre, Switzerland, R&D Carbon Ltd, 2000, 397 pages.
- [71] : M. Tkac, T. Foosnæs, and H. A. Øye, « Effect of Vacuum Vibroforming on Porosity Development during Anode Baking », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2007, p. 885-890.
- [72] : J. A. Brown and P. J. Rhedey, « Characterization of prebaked anode carbon by mechanical and thermal properties », *TMS Light Metal*, 1975, p. 298-306.
- [73]: M. Tkac, *Porosity Development in composite Carbon Materials during Heat Treatment*, PHD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2007, 168 pages.
- [74] : S. Gao, C. Bao, S. Zhang, H. Wang, J. Woo and E. Cutshall, « Optimum vibration time for green anode production », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2013, p. 1123-1126.
- [75] : E. Sandvik, R. Blindheim and H. M. BØ, « Vibration forming of carbon blocks », *TMS Light Metal*, 1974, p. 339-350.
- [76] : H. Vincent, J. F. André and A. Pinoncely, « XELIOS™, a vibrocompactor designed for producing high density anodes », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2007, p. 1029-1034.
- [77] : D. Gates, *Modelling and simulation of a vibroformer for carbon anodes used in aluminium production*, Comalco Research Centre, 1992, 16 pages.

-
- [78] : M. Paskota, « On modeling and the control of vibroformer in aluminium production », *Chaos, Solitons & Fractals, Elsevier Science Ltd*, Vol. 9, No. 1/2, 1998, p. 323-335.
- [79] : An American National Standard, *ASTM C651-91 (Reapproved 2005), Standard test method for flexural strength of manufactured carbon and graphite articles using four-point loading at room temperature*, 2010, p. 205-207.
- [80] : F. C. L. Durand, D. Rouby, G. Fantozzi, B. Allard and D. Dumas, « Characterization of the high-temperature mechanical behavior of carbon materials », *Carbon*, Vol. 32, N 5, 1994, p. 857-865.
- [81] : W. K. Fischer and R. Perruchoud, « Determining prebaked anode properties for aluminum production », *Journal of metals*, Vol. 9, N 11, 1987, p. 43-45.
- [82]: W. K. Fischer and F. Keller, « Baking parameters and the resulting anode quality », *TMS Light Metals*, 1993, p. 683-689.
- [83] : B. Allard, D. Rouby, G. Fantozzi, D. Dumas and P. G. Lacroix, « Fracture behaviour of carbon materials », *Carbon*, Vol. 29, N 3, 1991, p. 457-468.
- [84] : O. E. Frosta, A. P. Ratvik, H. A. Øye, « Properties and Production Conditions Affecting Crack Formation and Propagation in Carbon Anodes », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metals*, 2012, p. 1293-1298.
- [85]: C. Dreyer and B. Samanos, « An approach for complete evaluation of resistance to thermal shock applying to the case of anodes and cathodes », *TMS Light Metals*, 1997, p. 585-590.
- [86] : T. Liua, A. Tomsettb and H. Zhangb « Thermal shock behaviour of industrial carbon anodes », *Carbon 38*, 2000, p. 1401–1409.
- [87] : M. W. Meier, W. K. Ficher and R. C. Perruchoud, « Thermal shock of anodes-A solved problem? » *TMS Light Metals*, 1994, p. 700-709.
- [88] : An American National Standard, *ASTM C749-08, Standard test method for tensile stress-strain of carbon and graphite* , 2010, p. 231-242.
- [89]: G. D'Amours, *Modélisation du comportement thermo-électro-mécanique de l'anode de carbone utilisée dans la production primaire de l'aluminium*, Thèse, Université de Laval, 2004, 223 pages.
- [90] : S. Wilkening, « Properties and Behaviour of Green Anodes », *TMS Light Metals*, 1999, p. 371-377.

-
- [91] : K. A. Sinclair and B. A. Sadler, « Which strategy to use when sampling anodes for coring and analysis?-Start with how data will be used », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2009, p. 1037-1041.
- [92]: D. H. Andersen and Z. Zhang, « Fracture and physical properties of carbon anodes for the aluminium reduction cell », *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 78, Issue 17, 2011, p. 2998–3016.
- [93] : R. C. Perruchoud, M. W. Meier and W. K. Fischer, « Survey on worldwide prebaked anode quality », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2004, 6 pages.
- [94]: D. Richard, G. D'Amours, M. Fafard, A. Gakwaya and M. Désilets, « Development and validation of a thermo-chemo-mechanical model baking of ramming paste », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metals*, 2005, p. 733-738.
- [95] : L. Eliassen, *Characterization of Mechanical Properties of Carbon Anode Material*, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2007, 111 pages.
- [96] : G. D'Amour, M. Fafard, A. Gakwaya and A. A. Mirchi, « Mechanical behavior of carbon cathode-Understanding-Modeling and identification », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metals*, 2003, p. 633-639.
- [97] : B. Allard, J. M. Dreyfus and M. Lenclud, « Evolution of thermal electrical and mechanical properties of graphitised cathode blocks for aluminium electrolysis cell with temperature », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metals*, 2000, p. 515-521.
- [98] : D. Picard; W. Bouzemmi, B. Allard, H. D. Alamdari, M. Fafard, « Thermo-Mechanical Characterization of Graphitic and Graphitized Carbon Cathode Materials Used in Aluminium Electrolysis Cells », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metals*, 2010, p. 823-828.
- [99]: W. K. Fischer and R. C. Perruchoud, « Test methods for the determination of prebaked anode properties», *R&D Carbon Ltd publication*, 1995, p.281-291.
- [100]: S. Wilkening and M. Beilstein, « The principles of VAW/KHD paste plant technology», *TMS Light Metals*, 1994, p.711-718.
- [101] : M. C. Brym, D. Laroche, A. Alexandre, M. P. Landry, C. Simard, L. Simard, and D. Ringuette « New Method for Representative Measurement of Anode Electrical Resistance », *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2012, p. 1299-1302.

-
- [102] : D. Bhattacharyay, D. Kocaefer, Y. Kocaefer, B. Morais and M. Gagnon, « A model for predicting the electrical resistivity of baked anodes», *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Light Metal*, 2013, p. 1195-1200.
- [103] : R. Rakotomalala, *Tests de normalité : Techniques empiriques et tests statistiques*, Université Lumière Lyon 2, 2011, 59 pages.
- [104] : S. Amrani, *Impact de la composition et de la préparation des anodes crues et des conditions de cuisson sur la fissuration dans des anodes denses*, thèse de doctorat en ingénierie à l'Université du Québec à Chicoutimi, 2015, p. 123-169.
- [105] : M. Thomas and F. Laville, *Simulation des vibrations mécaniques par Matlab, Simulink et Ansys*, Québec, Presse de l'Université du Québec, 2007, p. 95-250.
- [106] : M. Bouazara, *Vibration mécanique avancée*, Notes de cours 6DIG978, Université du Québec à Chicoutimi, 2010.
- [107] : L. Dion, *Notions statistiques de base et analyses multivariées*, Notes de cours, Université du Québec à Chicoutimi/Aluminerie Alouette, 2014, 33 pages.
- [108] : F. Janelle, *Étude théorique de la dynamique d'un vibro-compacteur*, mémoire de maîtrise, Université Laval, 1991, 95 pages.
- [109] : W. T. Thomason and M. D. Dahleh, *Theory of vibration with applications*, Fifth edition, New Jersey, Prentice Hall, 1998, p. 49-147.
- [110] : O. Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, 3rd. Ed, University of Minnesota, Prentice Hall, NJ, 1997, 689 pages.
- [111] : J. Ghidella, Math Work, *Simulink*, Accelerating the pace of engineering and science, 2014,
<http://www.mathworks.com/products/simulink/webinars.html>
- [112] : J. Perron, *Analyse des systèmes*, Notes de cours 6MIG801, Université du Québec à Chicoutimi, 2010.