

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE

ÉCOLE DE GÉNIE

**ÉTUDE DE CONCEPTION SUR LE CONVERTISSEUR DE COUPLE DE
CONSTANTINESCO**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

PATRICK BOURGAULT

FÉVRIER 2022

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier les gens suivants surtout pour leur patience et la confiance qu'il m'ont démontré.

Mélanie Gaudet pour son support indéfectible.

Marin Éné et Li Zhen Cheng mes directeur et directrice pour leur aide et leur support.

Pierre Bérubé et Jonathan Collins d'Abitibi Géophysique pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un de leur projet à travers un projet Mitacs.

J'aimerais aussi remercier Maxime Mailloux pour les échanges constructifs.

TABLE DES MATIÈRES

<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Table des matières</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>vii</i>
RÉSUMÉ	1
ABSTRACT	1
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
CHAPITRE 1: Présentation des mécanismes CCC	3
1.1 Présentation du convertisseur de couple de Constantinesco	3
1.2 Description du mécanisme utilisé pour l'étude	4
1.3 Objectifs de la recherche	6
1.4 Méthode de calculs élémentaire	7
1.4.1 Méthodes de simplification des mécanismes	7
1.4.2 Validation des simplifications	9
1.5 Résumé du chapitre 1	10
CHAPITRE 2: Analyse fonctionnelle et définition des types	12
2.1 Levier dynamique (Type A)	12
2.2 L'effet de levier positionnel (Type B)	15
2.2.1 Vilebrequin diode	15
2.2.2 Vilebrequin-balancier-diode	16
2.2.3 Effet levier ajustable, une transmission continuellement variable (CVT).	17
2.2.4 La version levier positionnel autorégulatrice	20

2.3	L'effet d'accumulation (Type C).....	23
2.4	Méthode d'identification du type.....	26
2.5	Résumé du chapitre 2.....	34
	<i>CHAPITRE 3: Équivalents du Convertisseur de couple de Constantinesco</i>	
	<i>dans d'autres domaines</i>	35
3.1	Décomposition fonctionnelle du CCC.....	35
3.1.1	Décomposition en fonctions de base pour le Type-A	36
3.1.2	Décomposition en fonctions de base pour le Type-B	36
3.1.3	Décomposition en fonctions de base pour le Type-C	36
3.2	Circuits équivalents et conversion vers les autres domaines.....	36
3.2.1	Circuits équivalents des composantes.....	37
3.3	Conversion du CCC vers le domaine hydraulique.....	38
3.3.1	Fonctionnement théorique du CCC en configuration surpresseur harmonique ...	39
3.3.2	Conversion avec une triade hydraulique.....	39
3.3.3	Modèle inélastique et DHS type A	40
3.3.4	Modèle élastique et CCC type C.....	41
3.4	Adaptation du DHS pour Abitibi Géophysique inc.	43
3.5	Conversion du CCC dans le domaine électrique	46
3.5.1	Moteur à cage d'écureuil et type-A.....	46
3.5.2	Moteur à rotor bobiné et type-AB.....	47
3.5.3	Bobines de Tesla et CCC type-C	47
3.6	Résumé du chapitre 3.....	47
	<i>CHAPITRE 4: Le CCC type A utilisé dans La voiture Constantinesco.....</i>	48
4.1	Exemple de conception d'un CCC type A.....	49
4.1.1	Caractériser l'utilisation désirée et déterminer la puissance requise	51
4.1.2	Sélectionner un moteur à combustion et le caractériser	51
4.1.3	Dimensionnement du CCC type A.....	52

4.1.4	Energie transmise.....	69
4.1.5	Calculs de résistance des pièces.....	71
4.2	Résumé du chapitre 4.....	71
	<i>Conclusion.....</i>	<i>72</i>
	<i>Bibliographie.....</i>	<i>75</i>
	<i>Annexe A: Dessins du banc d'essai.....</i>	<i>77</i>
	<i>Annexe B : Rapport pour Abitibi-Géophysique.....</i>	<i>105</i>
	<i>Annexe C : Calcul DMC CCC type A.....</i>	<i>136</i>

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : https://en.wikipedia.org/wiki/George_Constantinescu (2021-01-06)	3
FIGURE 2 : IMAGE TIRÉE DE L'ARTICLE «THE CONSATNTINESCO TORQUE CONVERTER » [1] ...	4
FIGURE 3 : MÉCANISME MOTOÉLÉMENT-TRIADE-DIODE	5
FIGURE 4 : SOURCE DE L'IMAGE[1]. ALLONGEMENT POUR SIMPLIFICATION	8
FIGURE 5 : SCHÉMA GRAPHE ET SCHÉMA BLOC DU MODÈLE ÉTUDIÉ	9
FIGURE 6 : EXEMPLE DE DIMENSION REQUISE POUR L'ANALYSE STRUCTOMATIQUE	10
FIGURE 7 : SUPERPOSITION DE LA STRUCTURE AVEC LE CCC TYPE A.....	13
FIGURE 8 : MODE DE FONCTIONNEMENT DU CCC TYPE A.....	14
FIGURE 9 : MÉCANISME VILEBREQUIN-DIODE - PRÉLUDE AU CCC TYPE B	15
FIGURE 10 : MÉCANISME VILEBREQUIN-BALANCIER-DIODE - PRÉLUDE AU TYPE B.....	16
FIGURE 11 : MÉCANISME AMPLIFICATEUR DE FORCE - PRÉLUDE AU TYPE B	16
FIGURE 12 : CCC TYPE B	17
FIGURE 13 : SCHÉMA SUPERPOSÉ AVEC LE CCC TYPE B.....	17
FIGURE 14 : TRACÉ DU TYPE B EN POSITION DÉPLACEMENT MAXIMAL	18
FIGURE 15 : TYPE B EN POSITION DÉPLACEMENT INTERMÉDIAIRE	19
FIGURE 16 : TYPE B EN POSITION DÉPLACEMENT MINIMAL.....	19
FIGURE 17 : TYPE B AVEC GRANDE INERTIE.....	21
FIGURE 18 : CCC TYPE B EN POSITION DE COUPLE MINIMAL.....	22
FIGURE 19 : CCC TYPE B EN POSITION DE COUPLE INTERMÉDIAIRE	22
FIGURE 20 : CCC TYPE B EN POSITION DE COUPLE MAXIMAL.....	23
FIGURE 21 : TYPE C AVEC BALANCIER.....	24
FIGURE 22 : IMAGE TIRÉE DU BREVET 1,569.719	24
FIGURE 23 : TYPE C AVEC RESSORT	25
FIGURE 24 : IMAGE TIRÉE DU BREVET 1,569,719	25
FIGURE 25: MÉCANISME CCC DE TYPE COMPLEXE.....	28
FIGURE 26: TYPE B	29
FIGURE 27: LEVIER CACHÉ	29
FIGURE 28: MODIFICATION POSSIBLE.....	30

FIGURE 29: TYPE A.....	31
FIGURE 30: RESSORT GRAVITATIONNEL.....	32
FIGURE 31: TYPE BC	32
FIGURE 32 : MÉCANISME SÉPARÉ.....	33
FIGURE 33 : CONVERSION PARTIELLE DU CCC	40
FIGURE 34 : DHS TYPE A.....	41
FIGURE 35 : DHS TYPE C	42
FIGURE 36 : VUE ISOMÉTRIQUE DU DHS TYPE C	44
FIGURE 37 : VUE EN COUPE LONGITUDINALE DU DHS TYPE-C	44
FIGURE 38 : VUE EN COUPE DHS TYPE-C	45
FIGURE 39 : ÉLEVATION ET PLAN DU BÂTI DE LA CONSTANTINESCU	48
FIGURE 40 : VUE EN COUPE DU CCC DE LA CONSTANTINESCU [1] AVEC ANOTATIONS.....	50
FIGURE 41 : COURBE PUISSANCE ET COUPLE VS VITESSE DE ROTATION.	52
FIGURE 42 : VUE EN COUPE DU CCC DE LA CONSTANTINESCU[1]	53
FIGURE 43 : CCC TYPE A.....	54
FIGURE 44 : IMAGE TIRÉE DU BREVET 1,542,668	55
FIGURE 45 : MÉCANISME CCC DE LA CONSTANTINESCU.....	55
FIGURE 46 : SIMPLIFICATION DU BALANCIER	56
FIGURE 47 : IMAGE D'UNE DIODE MÉCANIQUE TIRÉE DU BREVET 1,618,915 AVEC L'AJOUT D'UN PIVOT.	57
FIGURE 48 : TRIANGLE POUR DÉTERMINER LA LONGUEUR DU BALANCIER	61
FIGURE 49 : COURBE ÉNERGIE PAR ROTATION	62
FIGURE 50 : CALCUL DE LA FORCE EN MODE SORTIE BLOQUÉE	64
FIGURE 51 : FORCES VS ANGLE DE ROTATION	67
FIGURE 52 : FORCES VS ANGLE DE ROTATION	67
FIGURE 53 : FORCE MAX APPLIQUÉE À LA SORTIE DU BALANCIER À BASSE VITESSE	68
FIGURE 54 : FORCE MAX APPLIQUÉE À LA SORTIE DU BALANCIER À HAUTE VITESSE.....	69
FIGURE 55 : FORCE APPLIQUÉE À LA SORTIE DU BALANCIER À HAUTE VITESSE.....	70

RÉSUMÉ

Dans ce mémoire, les mécanismes convertisseur de couple de Constantinesco (CCC) sont analysés afin de rendre plus accessible leur conception. Dans les mécanismes rencontrés plusieurs principes de fonctionnement sont concurrents. Leur importance dépend de la configuration du mécanisme. En isolant les différents principes de fonctionnement, il est possible de simplifier l'analyse mathématique de ceux-ci. Trois principes sont identifiés et les mécanismes sont classés par type à savoir : les type-A sont à base de levier dynamique, les types B utilisent des leviers positionnels et les type-C sont des accumulateurs d'énergie. Un exemple de conception sommaire d'un CCC type-A est donné à la fin du mémoire.

ABSTRACT

In this thesis, Constantinesco's torque converter mechanisms (CTC) are analyzed to render their conception more accessible. In encountered CTC, several operating principles are concurrent. Their importance depends on the configuration of the mechanism. By isolating the different principles, it is possible to simplify the mathematical analysis. Three principles have been identified and the mechanisms have been classified by type based on these principles. Type-A use dynamic lever, type-B use positional levers and type-C are based on energy storage. An example of a rough design of a type-A CTC is given at the end of the thesis.

Mots clé: Constantinesco, convertisseur de couple, CVT, mécanisme à membrure.

Keyword: Constantinesco, torque converter, CVT, linkage mechanism, CTC.

INTRODUCTION

Le mécanisme convertisseur de couple de Constantinesco [1], [2], abrégé par mécanisme CCC ou en anglais CTC pour Constantinesco Torque Converter, est une transmission infiniment variable (CVT), qui a été conçue dans les années 1920. La particularité de cette transmission est qu'elle a été conçue exclusivement avec des membrures. Elle n'a pas connu de succès commercial. Cet échec a été imputé partiellement aux difficultés de compréhension du mécanisme qui utilise l'inertie et les oscillations de membrures et masses multiples pour faire varier le ratio vitesse/couple. Tel que Constantinesco le disait lui-même [2]: « *What I have discovered after many years of reflection, research and pretty hard work, is something which is simple but extraordinarily difficult to explain.* »

M. Constantinesco a réalisé plusieurs configurations de convertisseur de couple. Plusieurs brevets en témoignent [3]–[8]. La description des brevets montre leur fonctionnement général. Les mécanismes réels construits étaient optimisés pour des applications spécifiques. Les détails des calculs de conception de ces mécanismes se sont malheureusement perdus avec le temps. Et les différentes versions développées utilisant ce principe sont peu documentées ou sont présentées avec un niveau mathématique élevé, ce qui les rend peu accessibles.

Ce qu'on retrouve constamment dans ses réalisations de transmission CCC, sont une entrée qui est alimentée par une source de puissance oscillatoire et une sortie de diodes mécaniques. Le seul contrôle que l'utilisateur possède sur le mécanisme est un levier qui fait office d'accélérateur, de contrôleur de vitesse et même parfois d'inverseur de direction.

Malgré l'apparence de simplicité mécanique, la complexité conceptuelle du mécanisme se répercute dans l'analyse mathématique. Afin de rendre cette analyse plus simple, le mécanisme est analysé sous différentes configurations simplifiées. Il est possible de constater que les groupements de membrures remplissent des fonctions qui varient d'un système de levier à un accumulateur d'énergie. Le fonctionnement réel du mécanisme doit donc être considéré comme une combinaison de plusieurs principes de fonctionnement dont l'importance dépend de la configuration et de la position des membrures. Les principes de fonctionnement sont mis en évidence à l'aide de configuration du mécanisme qui maximisent l'importance de chacun des principes.

Toutes ces variations font en sorte qu'il est essentiel d'établir une définition plus précise du CCC. Cet ouvrage a pour objectif de démontrer que le convertisseur de couple de Constantinesco est en fait une famille de mécanisme dont le fonctionnement est similaire. Afin d'éliminer la confusion dû aux différents principes de fonctionnement qui seront présentés et qui font partie intégrale des mécanismes CCC. Il a été établi que le principe de fonctionnement doit être énoncé dans la définition des membres de la famille des CCC afin de les différencier.

CHAPITRE 1: PRÉSENTATION DES MÉCANISMES CCC

1.1 Présentation du convertisseur de couple de Constantinesco

Le convertisseur de couple à l'étude fut inventé par l'ingénieur roumain George Constantinesco (1881-1965 Prononciation en roumain : Gogu Constantinescu).

Généralement décrit comme une transmission inertielle, le convertisseur de couple de Constantinesco (CCC) est un mécanisme à membrure qui fait office de transmission continuellement variable (CVT). Ce mécanisme doit être alimenté par un mouvement oscillatoire. Sa sortie est une diode mécanique. La figure 1 montre la seule voiture commercialisée (1922) avec ce type de transmission.

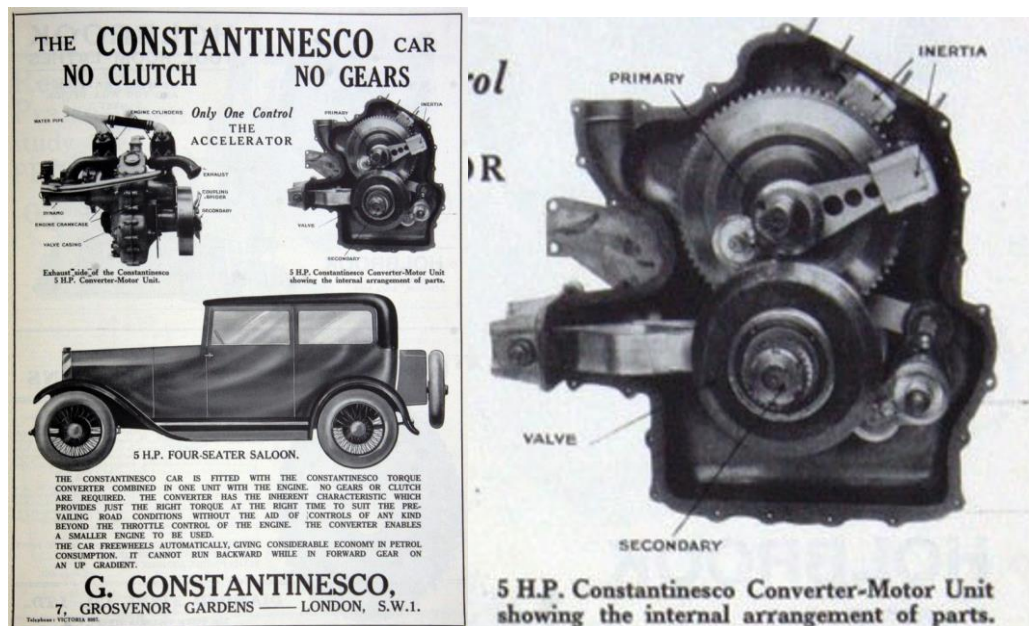


Figure 1 : https://en.wikipedia.org/wiki/George_Constantinescu (2021-01-06)

Le CCC a aussi été installé sur de petites locomotives et des wagons automoteurs [9]. Le mécanisme n'a cependant pas été utilisé à grande échelle.

Généralement lorsque quelqu'un tente d'expliquer le fonctionnement d'une transmission inertielle l'image de la figure 2 est utilisée.

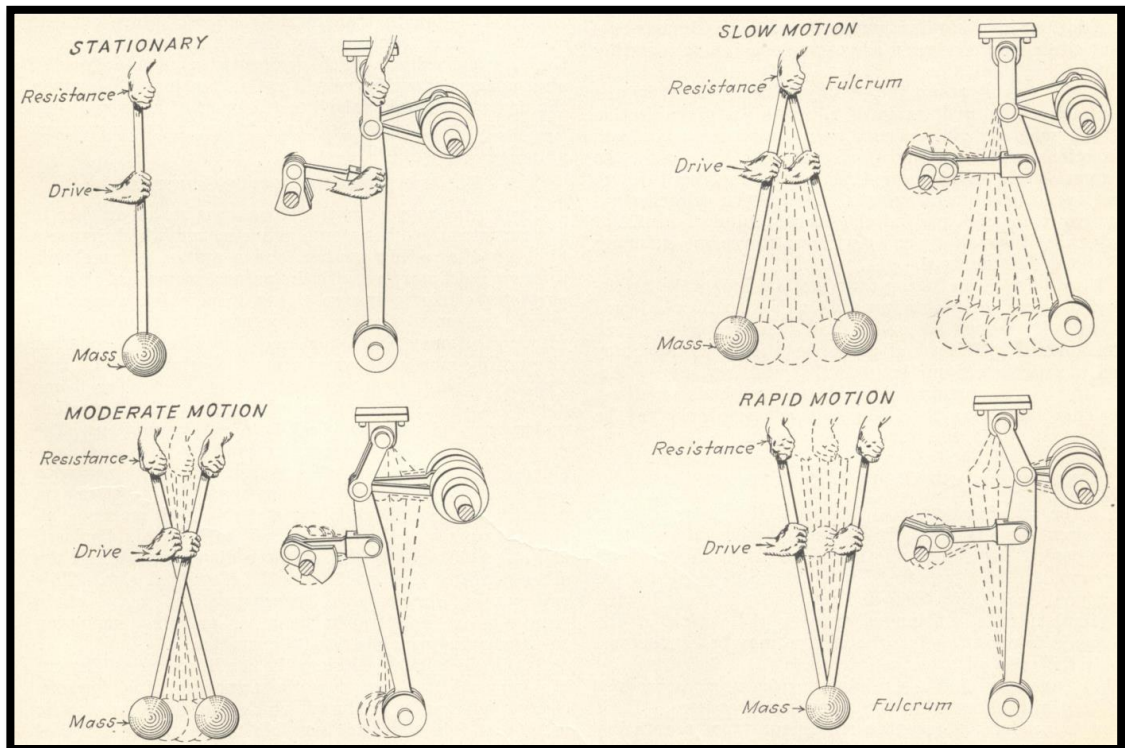


Figure 2 : Image tirée de l'article «THE CONSANTINESCO TORQUE CONVERTER » [1]

Le convertisseur de couple a déjà fait l'objet de plusieurs articles et recherches [9]–[15]. Bien que plusieurs modèles et prototypes de transmission inertiels ont été conçus et construits par Constantinescu et d'autres inventeurs, aucune version ou application actuelle (2021) n'a été trouvée dans le commerce.

1.2 Description du mécanisme utilisé pour l'étude

En cours de recherche, et à la suite d'essais sur des montages exploratoires réalisés sur le banc d'essai présenté en annexe A, la configuration qui s'est démarquée comme la plus efficace pour étudier et démontrer les différents principes de fonctionnement

concurrents prend la forme motoélément-triade-diode. La figure 3 montre un exemple schématique de ce mécanisme. Cette configuration s'est démarquée parce qu'elle est facilement superposable avec plusieurs schémas des brevets consultés [3]–[8] et qu'il est possible de la décomposer pour expliquer le raisonnement permettant d'isoler les principes de fonctionnement du mécanisme étape par étape.

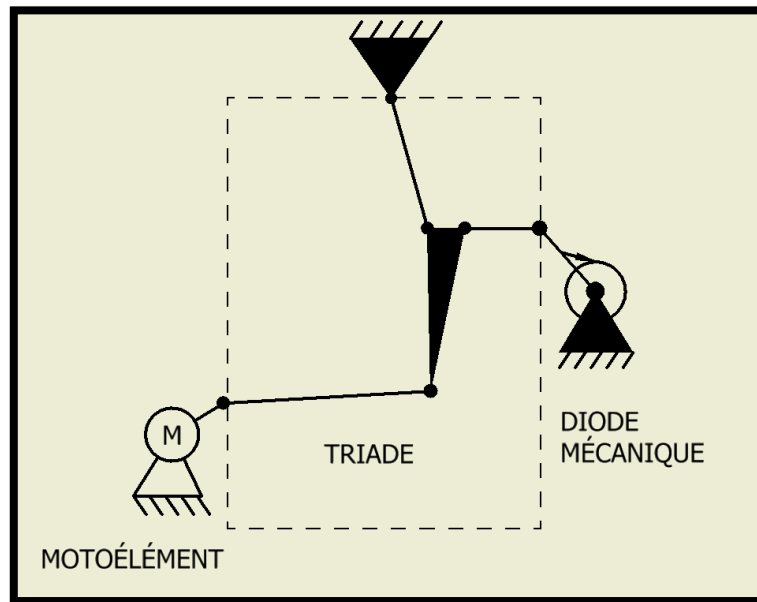


Figure 3 : Mécanisme motoélément-triade-diode

Les mécanismes CCC ne présentent pas nécessairement cette configuration. Il y a plusieurs autres configurations qui permettent un fonctionnement similaire. Il était cependant essentiel pour démontrer la concurrence de multiples principes de fonctionnement d'avoir un seul mécanisme qui permet de les isoler tour à tour.

L'analyse mathématique du mécanisme peut se faire de diverse méthode. Celle choisie est celle des structomats, décrite dans le livre de Marin Éné, Introduction à la théorie des mécanismes, modèles et méthode[16]. La diode mécanique ne faisant pas parties des structomats répertoriés, celle-ci a été modélisée comme un motoélément. La présence de ce deuxième motoélément permet de respecter la condition de système

desmodromique. Il permet aussi de simuler les différents modes de fonctionnement. Le motoélément qui remplace la diode mécanique est renommé motorésistance (MR). Il est différencié du motoélément classique parce que qu'il est non défini mathématiquement pour une analyse cinématique seulement. Sa définition requière une analyse cinéto-statique à chaque itération de l'analyse cinématique. Il est aussi associé à une résistance puisque ce motoélément représente la charge du système et l'énergie est sortie du système par la diode mécanique.

Avec cette configuration il est possible d'approximer un système dynamique. Après chaque itération cinétique, il faut faire l'analyse cinéto-statique. Il est alors possible de déterminer l'énergie fournie par le motoélément et de modifier la position de la motorésistance pour la prochaine itération. Le tout basé sur l'inertie ou autres propriétés du système entraîné par le mécanisme.

Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel Scilab (www.scilab.org) à partir des fonctions et méthodes décrites dans le livre [16]. Dans ce cas, en plus des deux motoéléments, la fonction Triade RR-RR-RR est utilisée.

1.3 Objectifs de la recherche

Les objectifs de cette recherche sont les suivants :

- Objectifs principaux
 - Aider dans la communication entre confrères qui travaillent sur le CCC.
 - Comprendre le processus de conception utilisé par l'ingénieur G. Constantinescu dans le contexte du début 20^e siècle.
 - Améliorer la méthode de synthèse des mécanismes du CCC avec des moyens mathématiques modestes.

- Objectifs spécifiques
 - Déterminer les parties essentielles du convertisseur.
 - Possibilité de convertir vers d'autres milieu ou domaine.
 - Établir une méthode de conception élémentaire qui aboutit à un modèle qui constitue une solution viable pour des essais et susceptible à être améliorée.
 - Développer une version utilisable dans le projet d'Abitibi-Géophysique.
 - Établir si l'inertie est le seul phénomène exploité dans le CCC.

1.4 Méthode de calculs élémentaire

Selon la méthode simplifiée du livre Trata de Theori sonicitii [17] les diverses grandeurs peuvent être exprimées sous une équation de la forme,

$$x = X \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

Où

- x - une distance, une vitesse, une accélération, une force... selon le cas
- X - l'amplitude maximale de la variable
- ω - la vitesse angulaire
- t - le temps
- ψ - l'angle de phase

Cette formulation est utilisée à la suite des modifications des schémas d'analyse des mécanismes pour permettre de simplifier l'analyse mathématique.

1.4.1 Méthodes de simplification des mécanismes

Pour faciliter l'étude des mécanismes observées dans la littérature, des artifices de simplification ont été utilisés afin de simplifier les analyses mathématiques. Les approximations présentées sont essentiellement des transformations géométriques puisque les analyses partent généralement du dessin d'un mécanisme. Les mécanismes

obtenus après simplification ont été introduites dans des calculs structomatique. Même si la marge d'erreur est considérable, elle permet une flexibilité nécessaire pour la configuration des mécanismes.

1.4.1.1 Projections à l'infini des pivots

La projection des pivots à l'infini ou l'allongement infini de la longueur des membrures permet d'utiliser seulement un axe pour la formulation des grandeurs. Cette formulation correspond à l'équation (1). Cette projection à l'infini des pivots est la version géométrique de la diminution du nombre de dimensions. La figure 4 montre la simplification d'un mécanisme pour l'analyse du balancier. Les projections se font à des angles de 90 degrés. Cette simplification élimine la composante verticale du support du balancier, la composante verticale du vilebrequin et la composante verticale sur la diode. Ce qui donne l'analyse d'un simple levier.

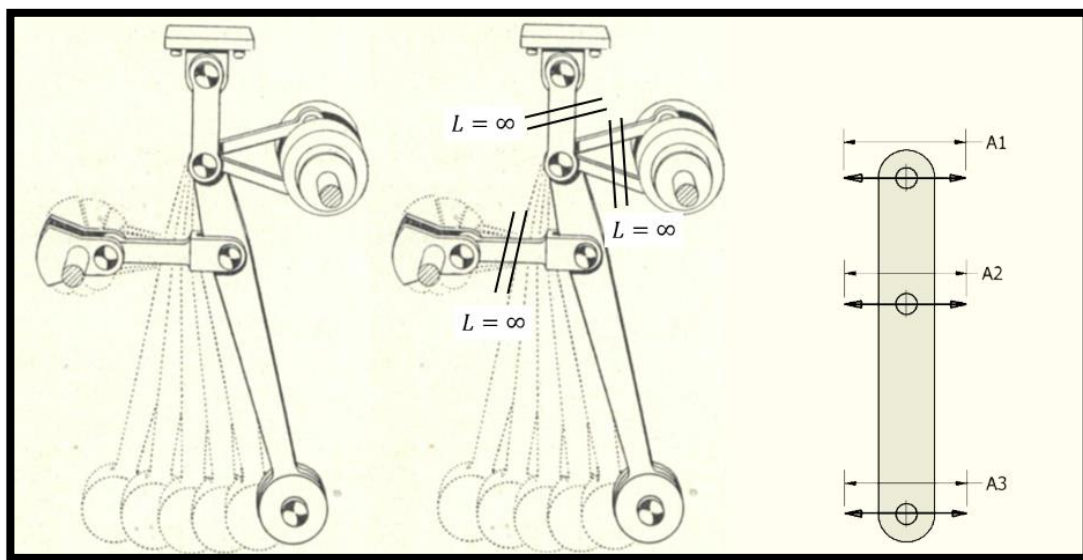


Figure 4 : Source de l'image[1]. Allongement pour simplification

Cette transformation géométrique est l'équivalent d'une diminution du nombre de dimensions.

1.4.1.2 Superposition et séparation de pivot

La superposition de pivots permet d'éliminer les membrures qui complexifie le mécanisme sans apporter de modification significative au principe de fonctionnement. La séparation des pivots permet de remplacer les pivots complexes par plusieurs pivots simples.

1.4.1.3 Régime permanent et valeur moyenne

Les analyses sont effectuées en régime permanent. La fréquence, l'amplitude et la puissance des sources (entrées et sorties) sont constantes pour l'analyse. Les calculs sont réalisés pour différents paramètres afin de comprendre l'impact de chacun d'eux.

1.4.2 Validation des simplifications

La validation des simplifications peut être réalisée de plusieurs façon. La méthode utilisée dans cette étude est une comparaison avec une analyse structomatique. Le modèle motoélément-triade-motorésistance correspond aux schémas de la figure 5.

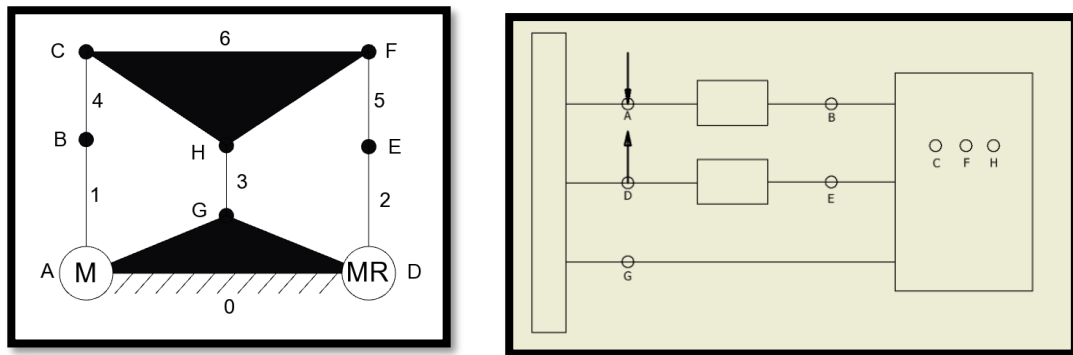


Figure 5 : Schéma graphe et schéma bloc du modèle étudié

Cette configuration correspond à la formulation :

$$Z(0) + ME(1) + MR(2) + TRIADE(3,4,5,6) \quad (2)$$

La figure 6 est un exemple de modèle de base pour les calculs de structomatique avec dimensions pour un CCC du type A utilisé dans le design de la transmission pour une voiture au chapitre 4. Le script de calcul peut être trouvé en annexe C.

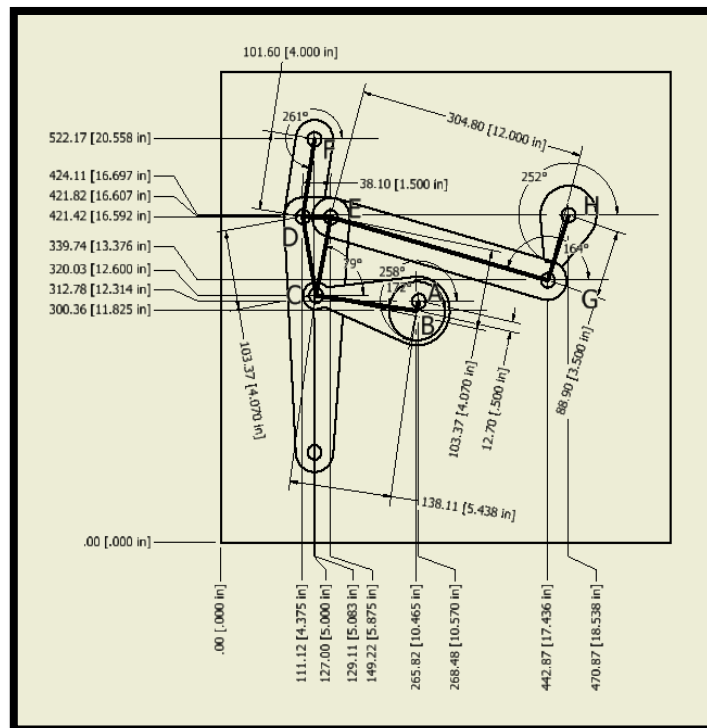


Figure 6 : Exemple de dimension requise pour l'analyse structomatique

1.5 Résumé du chapitre 1

Le mécanisme motoélément-triade-diode a été sélectionné parce qu'il facilite l'explication des différents principes de fonctionnement. C'est un système simple dont les composantes structomatiques sont déjà bien définies à l'exception de la diode qui est remplacée par une motorésistance. L'utilisation des algorithmes et scripts déjà établis facilitent l'analyse. Pour résoudre la position de la motorésistance. Les algorithmes cinéostatiques peuvent être insérés dans la routine cinématique afin de connaître les forces en jeu et approximer l'énergie fournie au système. À partir de ce bilan d'énergie, la détermination à chaque itération de la position de la motorésistance

qui remplace la diode, permet d'approximer un système dynamique à partir des analyses cinématiques et cinétostatiques.

CHAPITRE 2: ANALYSE FONCTIONNELLE ET DÉFINITION DES TYPES

L'hypothèse est faite que le convertisseur de couple de Constantinesco est en fait une famille de mécanisme. La supposition que le CCC peut prendre différentes formes , mène à catégoriser les mécanismes [16]. Dans ce chapitre les configurations de mécanismes sont groupées en fonction de leur principe de fonctionnement. Un mécanisme à membrure fait la conversion du couple/vitesse. Pour effectuer cette conversion, il est possible de différencier plusieurs principes. Trois seront présentés afin de cerner les différents phénomènes en jeu. Le premier est un effet de levier dynamique, le deuxième est le levier positionnel variable et le troisième une accumulation d'énergie. Les phénomènes sont concurrents et leur participation dépend de la configuration du système. Les phénomènes ont été isolés en utilisant des configurations qui privilégient le phénomène à l'étude. Une lettre est associée de façon arbitraire à chaque type afin de simplifier les futures caractérisations. Il est alors possible de spécifier le type de CCC basé sur son principe de fonctionnement. Puisqu'il est possible de combiner les principes, un CCC type ABC pourrait très bien être rencontré. En fait les CCC sont tous de type ABC. Les types dont la participation est marginale sont simplement omis.

2.1 Levier dynamique (Type A)

Tel que mentionné précédemment la configuration que l'on rencontre généralement dans la littérature pour expliquer le fonctionnement du CCC est celle de la figure 2. Cette configuration utilise un levier dynamique. Ce principe permet de moduler la force appliquée à la sortie du levier en variant la vitesse des oscillations de l'entrée.

La figure 7 montre la superposition du mécanisme de base et du schéma motoélément-triade-diode. Le pivot, où trois membrures sont attachées, peut-être dédoublé sans modifier significativement le fonctionnement du mécanisme.

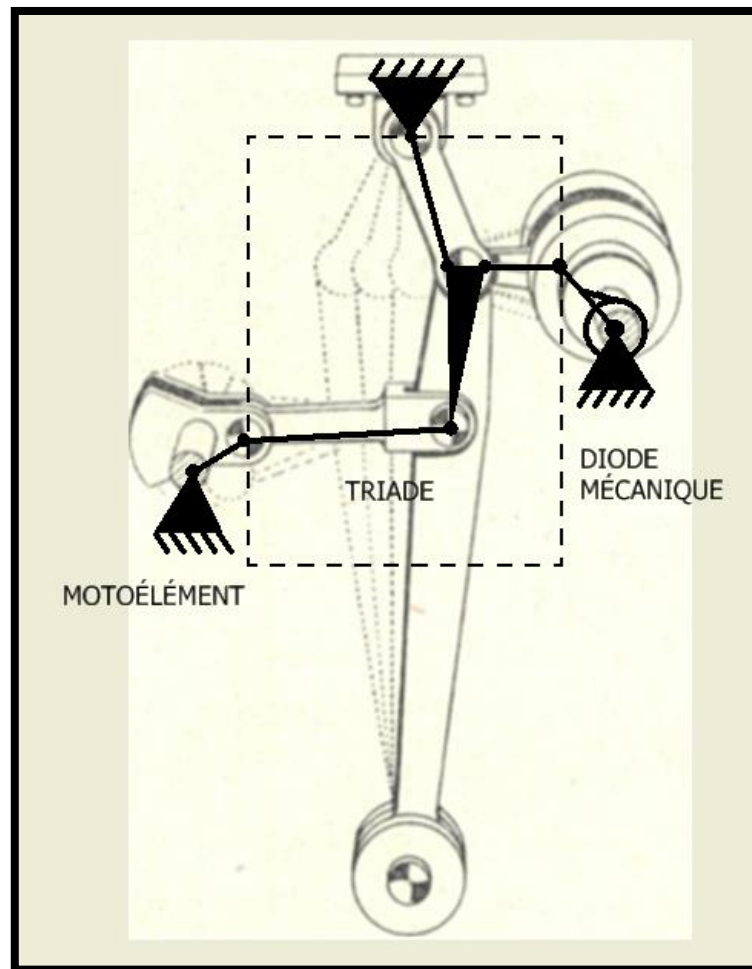


Figure 7 : Superposition de la structure avec le CCC type A

On remarque que le mode oscillatoire change avec le type de mouvement. La figure 8 montre les déplacements relatifs entre l'entrée et la sortie pour les différents modes d'opération en fonction de l'état de la sortie.

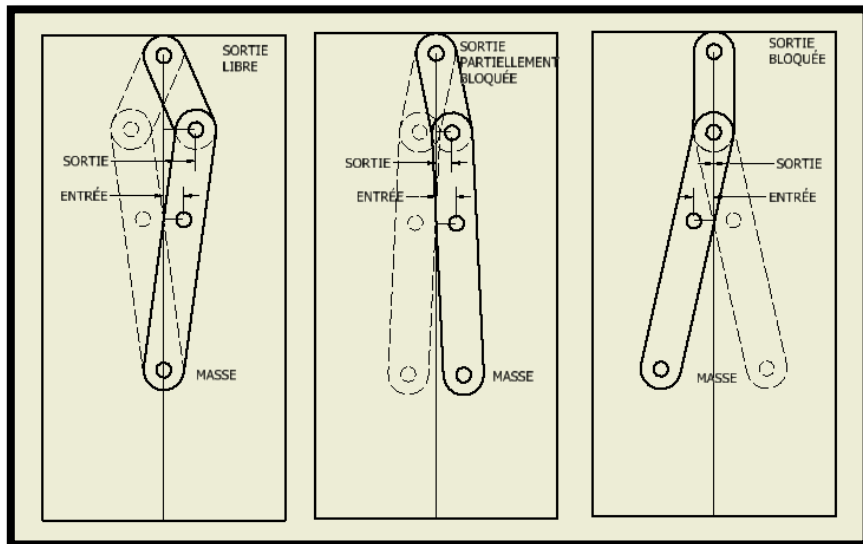


Figure 8 : Mode de fonctionnement du CCC Type A

Lorsque la sortie est libre l'oscillation de la masse est presque nulle. Lorsque la sortie est bloquée l'oscillation de la masse est maximale. La sortie partiellement bloquée représente les autres positions entre la sortie bloquée et la sortie libre. L'amplitude de l'oscillation d'entrée est constante.

En effectuant l'équilibre des forces sur la membrure qui agit comme un levier, la transmission de puissance selon ce principe dépend de l'accélération ou de l'inertie. La force d'inertie de la masse est équilibré par la force appliquée sur la sortie. Si l'oscillation d'entrée est très lente, l'accélération est très faible et la force appliquée sur la sortie est très petite. Plus la fréquence, la masse et l'amplitude sont élevées et plus la force appliquée à la sortie peut être grande. Ce qui signifie que pour le même mécanisme CCC, un moteur beaucoup plus puissant ne fournira pas plus de puissance à la sortie, si sa plage de vitesse est la même qu'un moteur moins puissant. Pour optimiser l'utilisation d'un moteur plus puissant, il faut augmenter la masse et/ou allonger le balancier et/ou augmenter la vitesse. Dans le type A, la masse est petite et

l'énergie emmagasinée n'est pas significative. Cette configuration possède 2 degrés de liberté et les positions sont complètement définies

2.2 *L'effet de levier positionnel (Type B)*

Le deuxième principe de conversion de couple est dû à un effet de levier positionnel. La conversion de vitesse/couple se fait en modifiant le rapport des bras de levier en changeant l'orientation des pièces et/ou des forces. Pour faciliter l'assimilation du concept, l'observation de mécanismes plus simples, qui évoluent vers le CCC est d'une grande aide.

2.2.1 **Vilbrequin diode**

Le premier mécanisme étudié est le vilbrequin et diode. L'image de la figure 9 suivante montre le mécanisme qui se compose d'un vilbrequin et d'une diode mécanique.

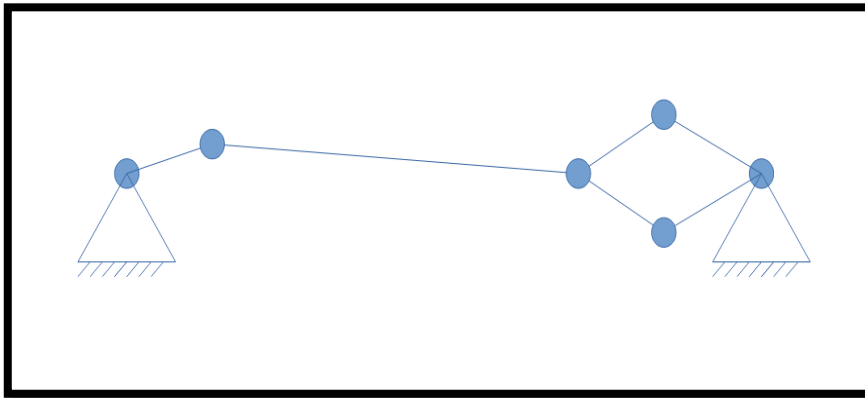


Figure 9 : Mécanisme vilbrequin-diode - prélude au CCC type B

Le mécanisme vilbrequin diode permet la transmission de puissance avec un rapport de vitesse fixe. La rotation de sortie sera saccadée/intermittente. Cette observation est vraie pour les mécanismes qui suivent.

2.2.2 Vilebrequin-balancier-diode

Le mécanisme vilebrequin-balancier-diode de la figure 10 permet de moduler le mouvement de sortie en modifiant la configuration du balancier. Dans la configuration de la figure 10 il n'y a pas d'amplification de force. La modification du balancier tel que dans la figure 11 permet d'utiliser l'effet de levier. La force appliquée à la sortie est augmentée et l'amplitude du mouvement de sortie est diminuée.

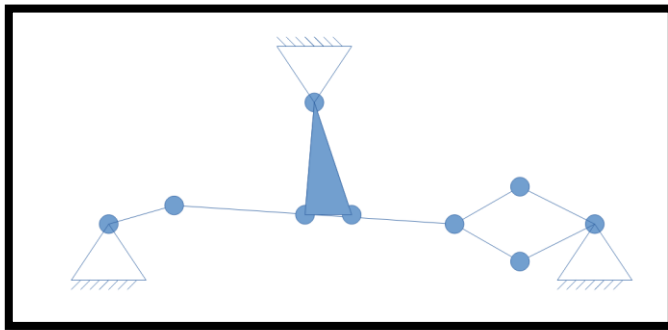


Figure 10 : Mécanisme vilebrequin-balancier-diode - prélude au type B

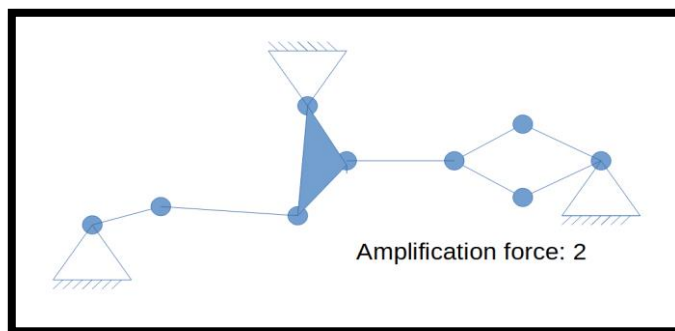


Figure 11 : Mécanisme amplificateur de force - prélude au type B

Selon le principe du levier conventionnel, la force de sortie maximale dépend directement de la force d'entrée maximale. Contrairement au type A, pour la même configuration du mécanisme, un moteur plus puissant pourra fournir plus d'énergie qu'un moteur moins puissant sur une même plage de vitesse.

2.2.3 Effet levier ajustable, une transmission continuellement variable (CVT).

Afin de démontrer que le mécanisme utilisant ce principe est différent du Type A, étudions le mécanisme de la figure 12, dont l'effet levier est ajustable par l'opérateur. Remarquons à la figure 13 que c'est un mécanisme ayant la configuration motoélément-triade-motorésistance. La même que le mécanisme Type A de la figure 7. La deuxième partie de la diode mécanique a été enlevée pour simplifier le dessin. Cela fait en sorte que ce mécanisme est en demi-rectification.

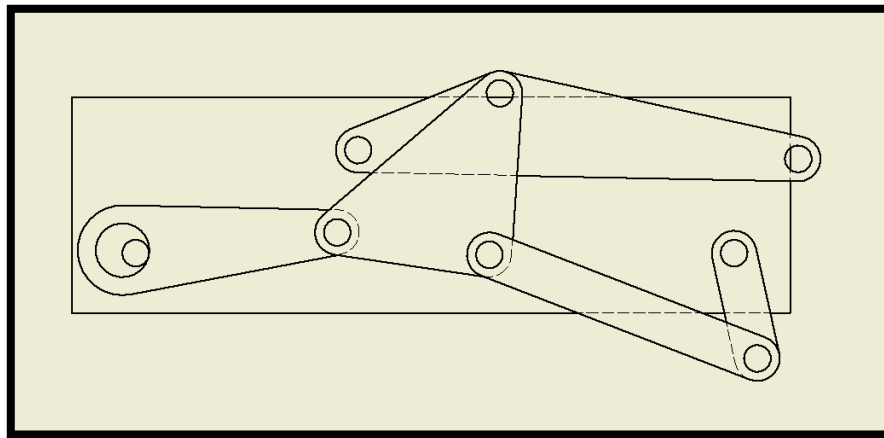


Figure 12 : CCC Type B

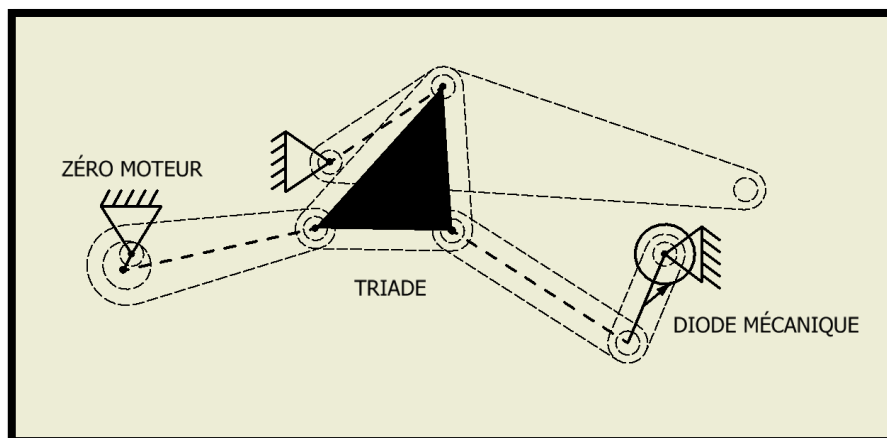


Figure 13 : Schéma superposé avec le CCC type B

La variation sera effectuée seulement par le positionnement de la membrure qui fait office de levier. La configuration de ce mécanisme permet de varier la vitesse de sortie. Dans la position de la figure 14, le déplacement à la sortie est maximal. Afin de conserver le levier en position et de permettre l'ajustement lors du fonctionnement du CCC un dispositif de contrôle est introduit, une vis sans fin en l'occurrence.

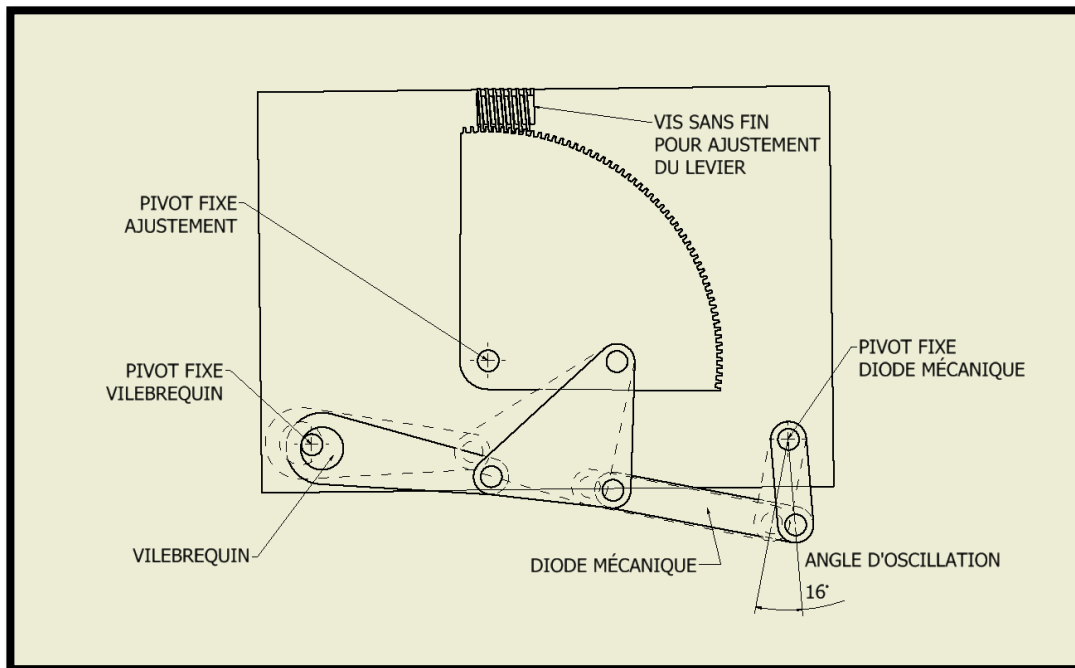


Figure 14 : Tracé du type B en position déplacement maximal

Plus le levier est ramené vers le haut et plus le mouvement des membrures de la diode diminue. Cela a pour effet de diminuer la vitesse de sortie. Ce qui est plus difficile à visualiser est que le couple maximal de sortie augmente avec cette baisse de vitesse. Le mécanisme en position intermédiaire à la figure 15 aura un déplacement de la sortie diminué tel qu'on peut le constater par l'angle d'oscillation. Le levier atteindra finalement une position où les oscillations des membrures de la diode sont presque nulles. Cette position est montrée à la figure 16. Le déplacement de la sortie est pratiquement nul dû à l'amplitude d'oscillation. Évidemment la rotation de sortie est

intermittente. Il est possible de combiner plusieurs mécanismes dont les entrées sont déphasées pour rendre la rotation de sortie plus constante.

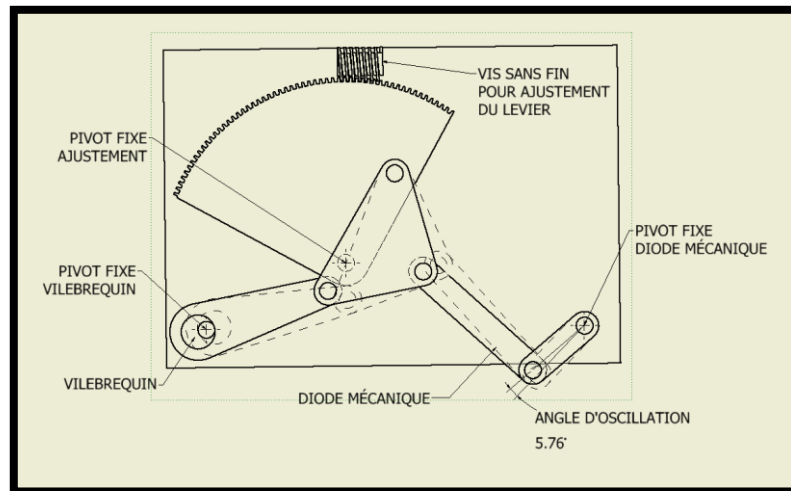


Figure 15 : Type B en position déplacement intermédiaire

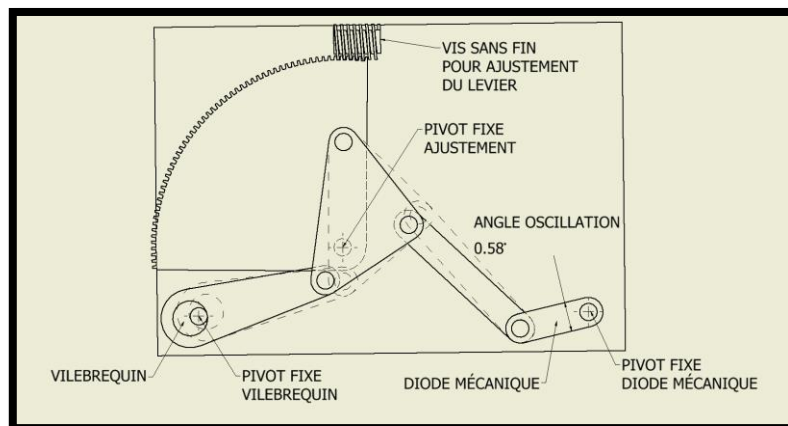


Figure 16 : Type B en position déplacement minimal

Ce qu'on constate est que cette configuration du mécanisme CCC permet de varier la vitesse infiniment vers zéro et inversement d'augmenter le couple. Il n'y a pas d'accumulation d'énergie et la vitesse de sortie est proportionnelle au ratio imposé par la position des membrures. Le ratio de l'effet levier est défini par la configuration de

la triade. La force de sortie n'est pas dépendante de l'inertie. Ce mécanisme possède 2 degrés de liberté et les positions sont complètement définies.

Il est possible de déduire que c'est ce principe de fonctionnement qui gouverne dans la description où un moteur électrique à vitesse constante est utilisé pour entraîner une machine outils [18]. Effectivement, lors de l'usinage d'une pièce, il faut maintenir la vitesse constante afin de respecter les vitesses de coupe optimales et pour l'uniformité de la finition. Puisque le moteur tourne à vitesse constante, le ratio de conversion de vitesse doit être constant pour conserver une vitesse de sortie constante. Le CCC type B, tel que dans la figure 12, possède cette caractéristique de pouvoir fixer le ratio. Le ratio pouvant être changé à l'aide du levier pour s'ajuster aux différents travaux.

2.2.4 La version levier positionnel autorégulatrice

La particularité de certaines versions du CCC est de pouvoir varier la vitesse/couple de sortie lorsque la position des membrures change. Dans un CCC type B, la membrure avec la masse sert à la régulation de la position des membrures. Le mécanisme se modifie en fonction des différentes forces en jeu. La configuration suivante est un exemple de configuration où la variation du mécanisme dépend surtout de la propriété inertielle de la membrure avec masse. Lorsque la masse est suffisamment grande elle sert d'inertie et le pivot triade/masse demeure à peu près fixe. Dans la figure 17, la configuration est équivalente au principe de levier positionnel de la figure 11. Le changement d'orientation du balancier change l'orientation de la triade et par le fait même le ratio de l'effet levier. La masse ne sert pas d'inertie qui applique une force sur la sortie. La masse est une inertie qui sert à maintenir la position du pivot de la triade.

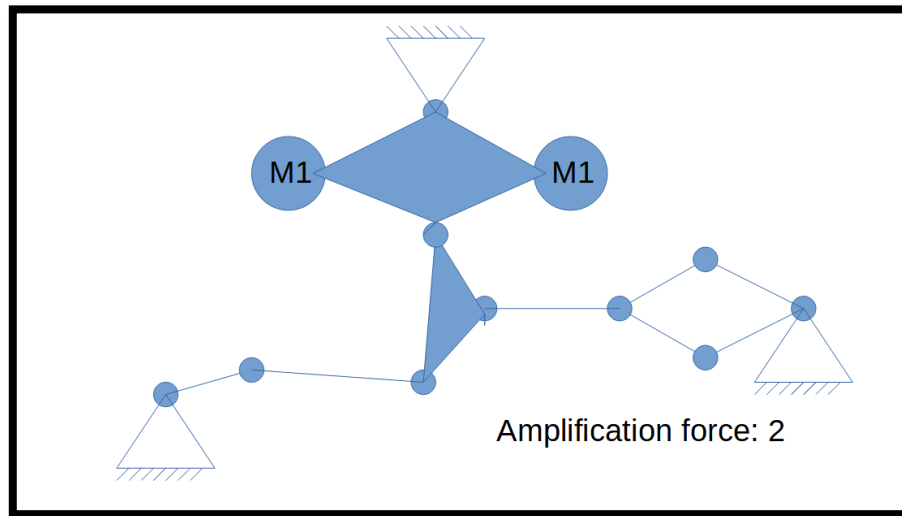


Figure 17 : Type B avec grande inertie

Ce qu'il faut différencier c'est que dans le premier principe le couple de sortie est dépendant de l'accélération tandis que celui-ci dépend principalement de la position des pivots. Dans le premier principe le ratio de levier est à peu près constant tandis que dans celui-ci l'orientation de la membrure domine la conversion du couple. Les figure 18, figure 19 et figure 20 montrent un mécanisme CCC dont la configuration se transforme avec son mouvement. La masse sert à empêcher le mouvement du pivot. À chaque rotation du vilebrequin la partie de l'énergie qui est transférée à la masse détermine son énergie potentielle et donc sa position. Si la force requise à la sortie est plus élevée, l'énergie transmise à la masse sera aussi plus élevée. Dans cette configuration le CCC type B se comporte aussi comme un CCC type A. Les deux principes de levier sont concurrents. La configuration du mécanisme correspond au modèle motoélément-triade-motorésistance.

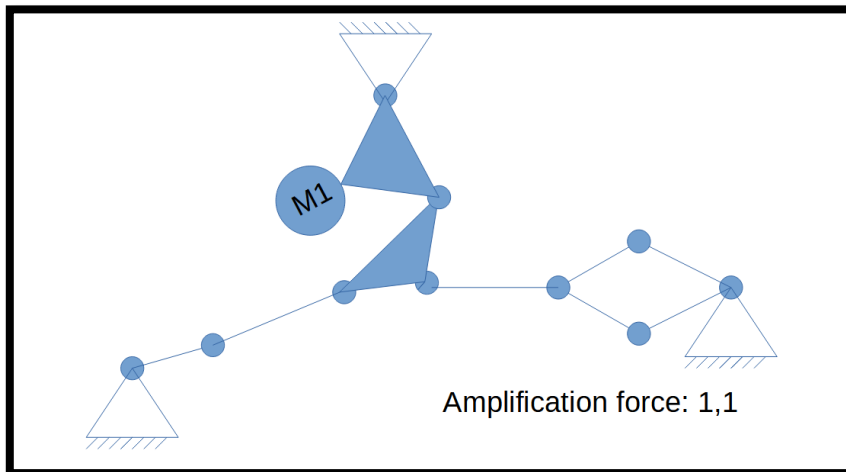


Figure 18 : CCC Type B en position de couple minimal

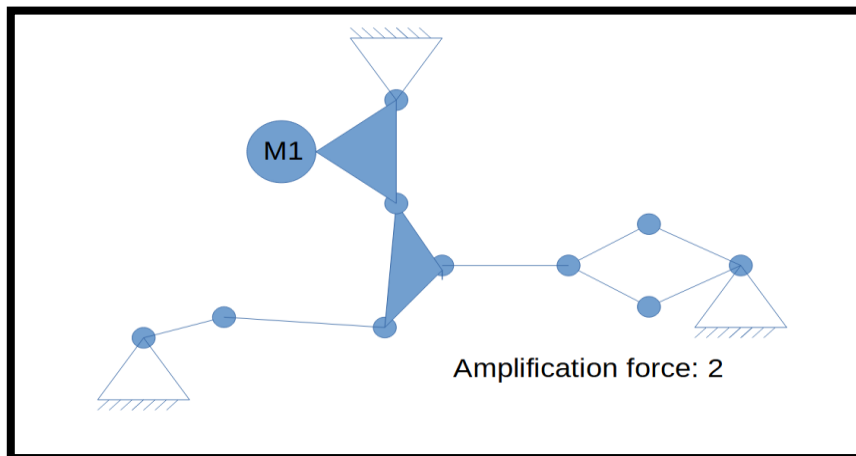


Figure 19 : CCC Type B en position de couple intermédiaire

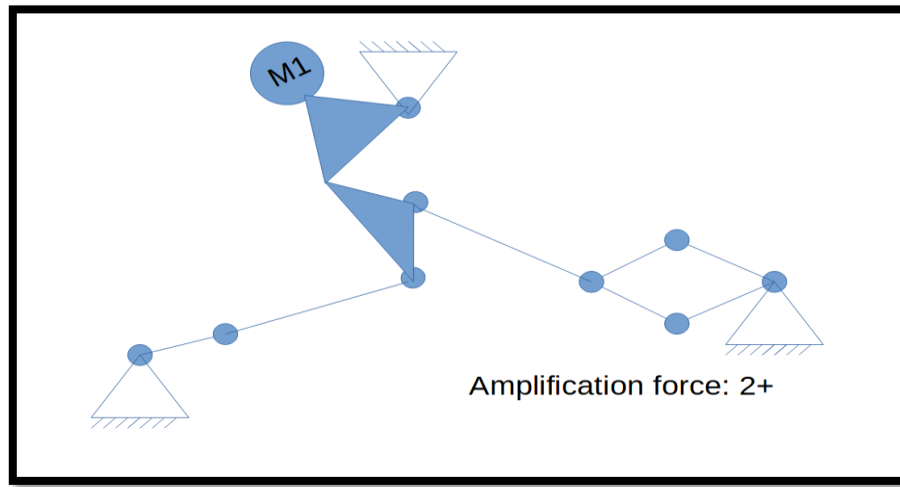


Figure 20 : CCC Type B en position de couple maximal

L'orientation de la pièce centrale de la triade modifie la valeur de l'effet de levier. Il faut que la masse soit suffisamment grande pour que sa fréquence d'oscillation soit beaucoup plus basse que celle de l'entrée. Cela aura pour effet de conserver la configuration à peu près constante pour des paramètres d'entrée/sortie à peu près constants sans que la masse oscille. L'utilisation d'un système d'amortissement est même conseillée pour diminuer le mouvement de la membrure avec masse.

Les deux principes de levier (A et B) sont concurrents. C'est-à-dire que les deux sont toujours présents. La proportion de leur participation dépend de la configuration du mécanisme.

2.3 L'effet d'accumulation (Type C)

L'autre phénomène qui peut être utilisé est celui de l'accumulation d'énergie. Il faut avoir une fréquence d'oscillation de la masse à peu près égale à celle de l'entrée afin d'entrer en résonance. Lors de son oscillation une partie de l'énergie de la masse en mouvement est transférée à la diode. Ce phénomène est plus difficile à visualiser avec les systèmes à membrures. La membrure de masse peut servir de ressort pour la

conservation de l'énergie. Dans le cas où la sortie est bloquée, l'énergie s'accumule dans la masse.

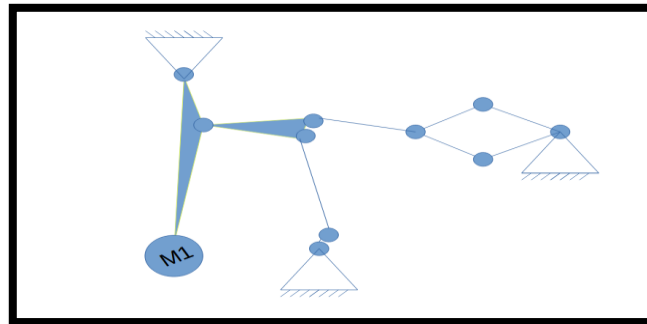


Figure 21 : Type C avec balancier

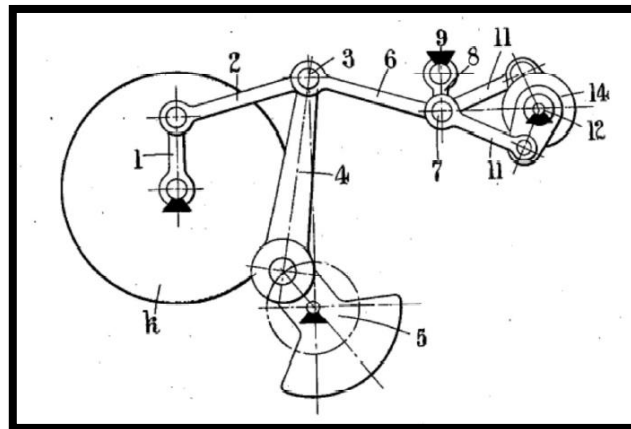


Figure 22 : Image tirée du brevet 1,569.719

Le mécanisme de la figure 21 possède la configuration motoélément-triade-diode. Celui de la figure 22 aussi après la conversion du pivot complexe 3 en deux pivots sur la membrure 2. Bien qu'il soit essentiellement de type A, la flexibilité des membrures 1,2 et 4 peuvent servir de ressort. Afin de démontrer que le mécanisme peut fonctionner principalement sous l'effet d'accumulation d'énergie la membrure 1 est remplacée par un ressort, représenté à la figure 23.

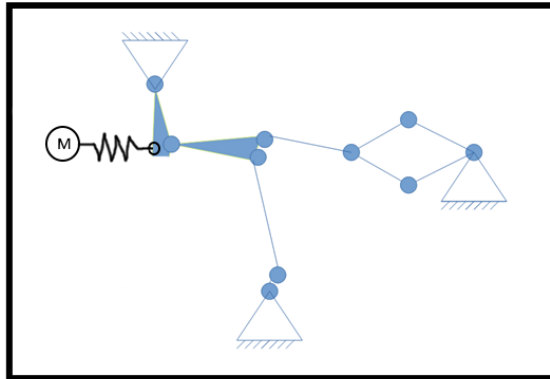


Figure 23 : Type C avec ressort

Ce principe possède cette caractéristique directement discernable, la présence de ressort. Dans certains des modèles de Constantinesco, il y a l'ajout de ressorts associées au balancier. Dans la figure 24 une roue d'inertie est fixée à l'arbre de la membrure 1 et est donc la même configuration de membrure que la figure 22. Sur cette même membrure sont fixés les ressorts qui sont requis comme accumulateurs pour la résonance harmonique. Cet ajout d'un ressort qui n'est pas essentiel, modifie le type A en type AC. Dans cette configuration il manque cependant un ressort entre la membrure 2 et 1 qui évite l'arrêt forcé du moteur.

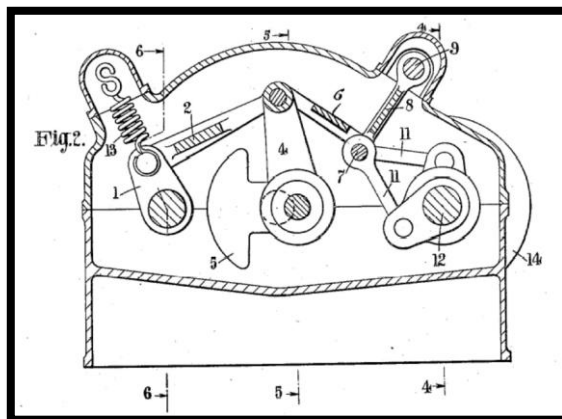


Figure 24 : Image tirée du brevet 1,569,719

La supposition de l'utilisation du phénomène de résonance est basée sur le fait que Constantinesco avait une compréhension avancée des propriétés élastiques des liquides et des solides. Malgré qu'aucun modèle de CCC principalement de type C, n'a été trouvée dans la littérature, il se pourrait bien que la théorie de transmission de puissance vibratoire [19] ait été utilisée dans tous les mécanismes de Constantinesco.

2.4 Méthode d'identification du type

Il a été établi que tous les CCC sont de type ABC. Il est possible d'identifier le ou les types dominants d'un mécanisme CCC à partir de la propriété de desmodromie. La desmodromie est la propriété qui établis qu'un mécanisme est fonctionnel par composantes. La propriété peut aussi être énoncée tel qu'un mécanisme demeure fonctionnel même si une de ses composantes est enlevée. Cette propriété est un critère obligatoire pour pouvoir réaliser les calculs de structomatique.

Les type A et C sont par définition fonctionnellement desmodromique indépendamment de l'état de la diode. Donc ils fonctionnent même si la sortie est bloquée. La classification du type se fait en modifiant le mécanisme à l'étude pour enlever le caractère desmodromique de l'analyse. Il est alors possible de détecter les type B. La diode mécanique est d'abord remplacée par un pivot fixe. S'il y a présence de ressorts, ils sont remplacés par des membrures rigides. Ne pas oublier que les membrures longues et mince qui sont plutôt flexibles se comportent comme des ressorts. Ne pas oublier que les masses qui montent et descendent sont reliées au ressort gravitationnel. Seuls les mécanismes avec une roue d'inertie peuvent être purement de type A. Le ressort gravitationnel d'un balancier à faible déplacement vertical peut être négligé.

Si le mécanisme obtenu est toujours fonctionnel alors le mécanisme est de type A ou B. La masse du balancier sert alors à différencier entre A et B. Comme mentionné précédemment la masse du type A est petite et la masse du type B est grande. La masse

maximale pour un type A correspond à l'équation (3). Une masse trop grande empêche le bon fonctionnement d'un mécanisme de type A. Les détails pour la définition de l'équation (3) se trouve à la section 4.1.3.6. L'énergie requise pour contrer la gravité doit être soustraite de l'énergie fournie par le moteur. Cette énergie est négligée dans le chapitre 4 dû aux hypothèses simplificatrices.

$$m = \frac{E_{max} - E_g}{v_{3max}^2} \quad (3)$$

Où,

Variable	Description	Unités
E_{max}	Énergie maximum disponible par tour par le moteur	[J/tour]
E_g	Energie requise pour soulever la masse sur une rotation	[J/tour]
v_{3max}	Vitesse maximale de la masse	[m/s]
m	Masse du balancier	[kg]

Si le mécanisme est bloqué ou bloque sur une partie de son mouvement il est de type B ou C.

Enlever ensuite les membrures qui avaient été ajouté à la place des ressorts. Si le mécanisme est fonctionnel sur toute la rotation du moteur, le mécanisme est de type C. Si le fait d'enlever une membrure sépare le modèle en deux et que la partie reliée au moteur est fonctionnelle, le CCC est aussi de type C en plus des autres types qui peuvent avoir été déterminés préalablement. S'il est bloqué ou bloque sur une partie de son mouvement il est de type B.

Cette procédure doit être effectuée pour plusieurs positions du pivot de remplacement de la diode. Le nombre suggéré est de trois. Les deux positions extrêmes et le centre.

Cette méthode est basée sur les propriétés définies précédemment. Plus précisément sur le fait que les type A et C doivent demeurer en mouvement même si la

diode bloque. Le mouvement du type C est assuré par un ressort. Lorsqu'on enlève cette flexibilité, le mouvement est empêché.

Pour ce qui est des type B le mouvement continu n'est pas obligatoire puisqu'on cherche à établir un ratio fixe comme dans le CCC avec un levier de contrôle.

Cette méthode est aussi valable pour les mécanismes CCC qui ne répondent pas à la configuration utilisée pour l'étude.

Prenons par exemple le mécanisme de la figure 25 et essayons de déterminer son type. Cette configuration est rencontrée fréquemment dans la littérature [8], [17]. Elle est utilisée pour expliquer le fonctionnement inertiel du CCC.

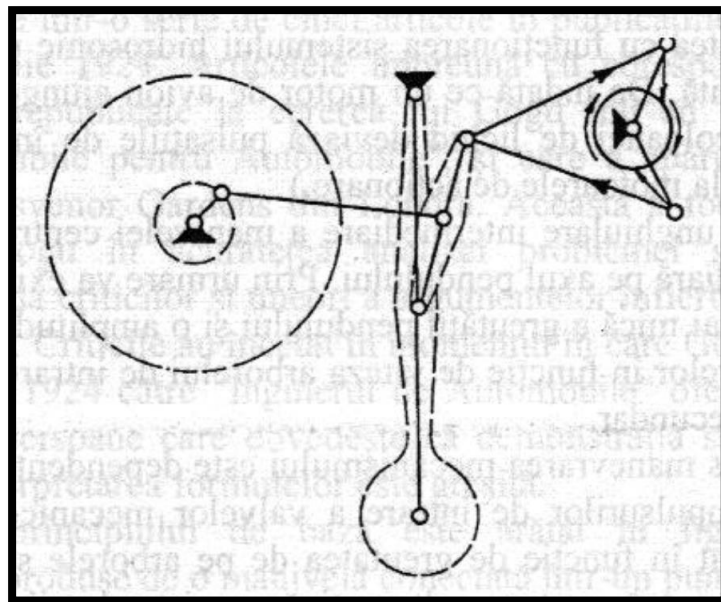


Figure 25: Mécanisme CCC de type complexe

Remplaçons d'abord les diodes mécaniques. Le mécanisme obtenu en figure 26 est un mécanisme bloqué. Il est donc de type B puisqu'il n'a pas de ressort. Ce qu'il est parfois difficile de percevoir avec les mécanismes à membrure sont les formes

rigides qui se dissimulent lors du fonctionnement. Lorsque la sortie est bloquée pour ce mécanisme, si le moteur n'est pas assez puissant le moteur s'arrêtera net. La figure 27 montre les leviers positionnels qui se dissimulent dans cette position bloquée. Ce système n'est pas principalement un système inertiel. Il est possible de déterminer l'effet du levier positionnel. Dans ce cas la force d'entrée est multiplié par environ 10.

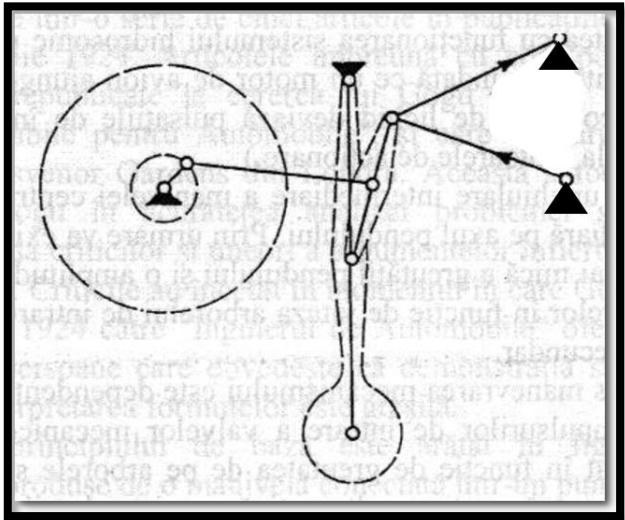


Figure 26: Type B

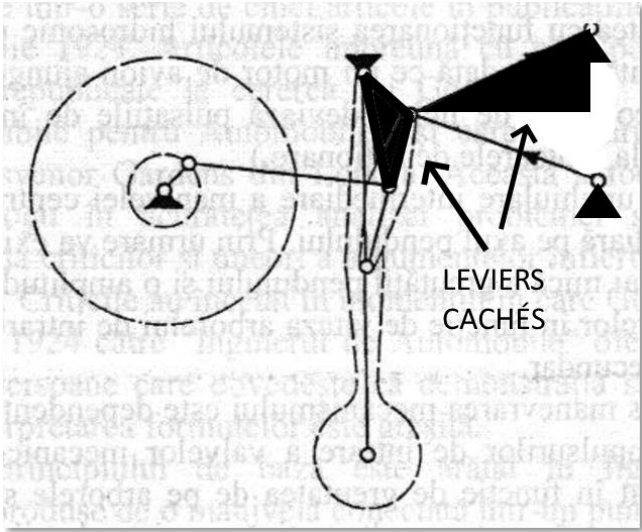


Figure 27: levier caché

Une solution possible pour faire de ce mécanisme un CCC de type A, est de modifier le pivot du balancier en une glissière tel que dans la figure 28. Cette configuration permet alors à la masse d'osciller même si la sortie est bloquée. Une autre solution est d'utiliser une demi-rectification tel que dans la figure 29. La force appliquée à la sortie dépend alors principalement de la force d'inertie. Cependant l'amplification de la force est inexistante.

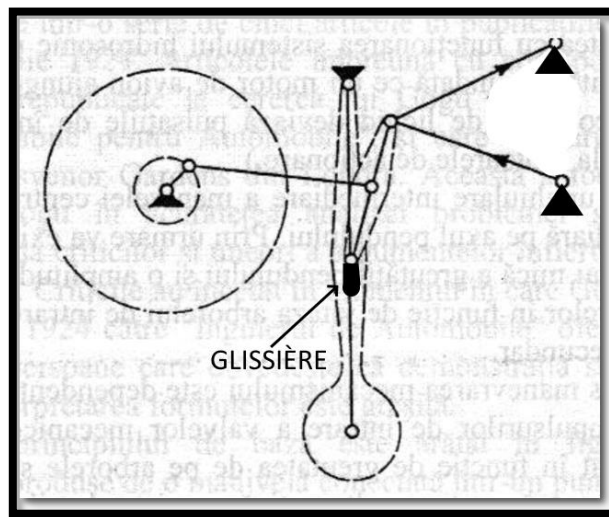


Figure 28: Modification possible

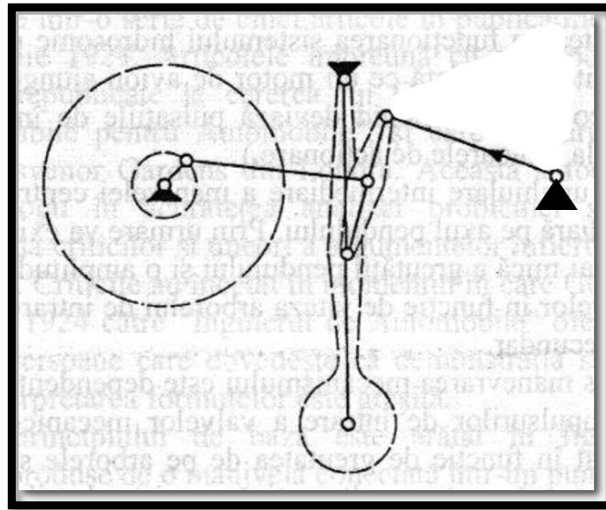


Figure 29: Type A

Remplaçons maintenant les ressorts par des membrures fixes. À première vue il n'y a pas de ressort. Cependant la flexibilité des membrures et la force de gravité doivent être considérés comme des ressorts tel que sur la figure 30. La membrure qui relie le vilebrequin au balancier n'a pas de ligne pointillée autour pour démontrer qu'elle est renforcée. Elle pourrait être longue et flexible. Ce qui ferait de ce mécanisme un type BC. Cette configuration préviendrait l'arrêt brusque du moteur en cas de blocage complet de la sortie.

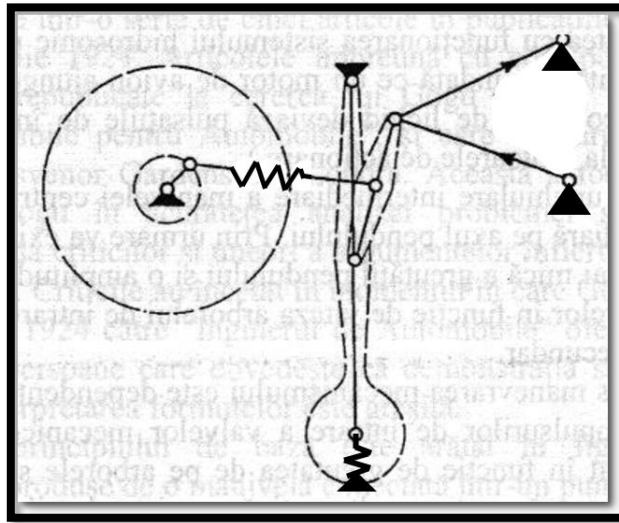


Figure 30: Ressort gravitationnel

Le ressort gravitationnel à généralement pour effet de bloquer complètement le mouvement lorsqu'il est remplacé par une membrure rigide. C'est aussi le cas pour les ressorts qui servent d'accumulateur d'énergie.

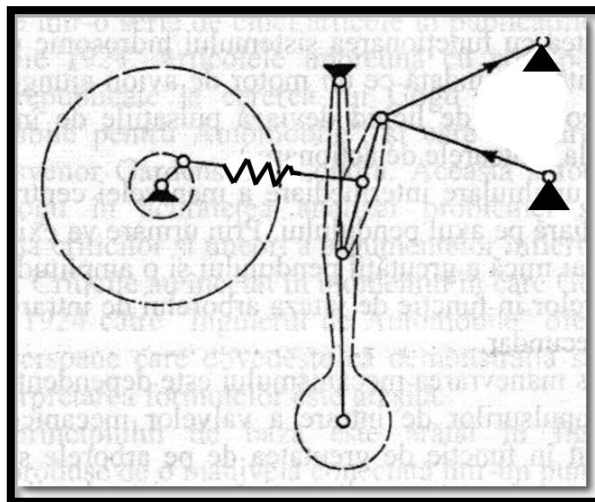


Figure 31: Type BC

Lorsqu'on enlève les ressorts il peut arriver que le mécanisme se sépare en deux tel que dans la transition de la figure 31 à la figure 32. Dans cette situation le mécanisme prend le type C en plus des autres types trouvés.

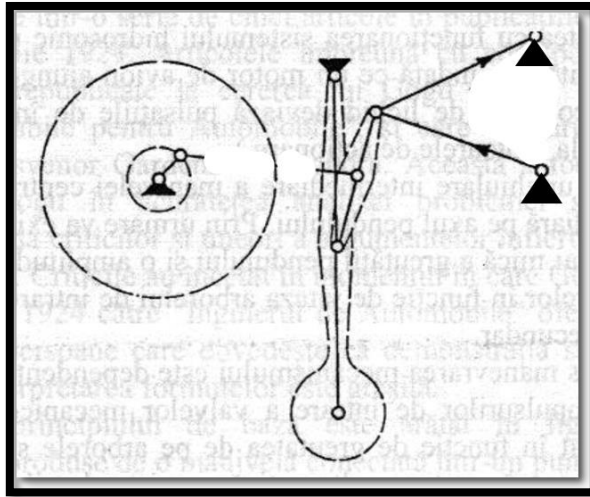


Figure 32 : Mécanisme séparé

Il arrive que le blocage du mécanisme ne soit pas évident comme sur la figure 26 ou que le blocage soit partiel. Dans ce cas une analyse cinématique s'impose. Dans une analyse structomatique [16], l'analyse cinématique est suffisante puisque les motorésistances qui remplacent les diodes sont alors enlevées. Le blocage est détecté par l'impossibilité de convergence du mécanisme. Afin d'éliminer la possibilité d'une erreur de données, il est préférable de faire l'analyse complète avec les motorésistances et ensuite refaire l'analyse avec les motorésistances bloquées.

Puisque ce mécanisme n'est pas de type A l'analyse de la masse n'est pas requise.

La configuration et les caractéristiques d'un mécanisme sont donc très importantes pour déterminer le comportement d'un CCC. Il est facile de confondre un type de mécanisme pour un autre.

2.5 *Résumé du chapitre 2*

Trois phénomènes complètement distincts qui permettent d'expliquer le fonctionnement des convertisseurs de couple de Constantinesco ont été isolés. Les phénomènes sont cernés et catégorisés comme étant :

- Type A : effet levier dynamique
- Type B : effet levier positionnel
- Type C : effet d'accumulation d'énergie

La présence des trois principes a été observée pour un mécanisme ayant la configuration motoélément-triade-diode. Les types sont concurrents pour toutes les configurations de CCC. Leur participation peut cependant être suffisamment marginale pour être négligée. Les CCC sont donc tous de type ABC. Pour la différenciation, seulement les types dont la participation est majeure sont indiqués.

Il existe une méthode afin de déterminer le type de fonctionnement principal d'un mécanisme CCC.

CHAPITRE 3: ÉQUIVALENTS DU CONVERTISSEUR DE COUPLE DE CONSTANTINESCO DANS D'AUTRES DOMAINES

Le dispositif CCC (Convertisseur de Couple de Constantinesco) est généralement connu sous la forme d'un mécanisme à membrure. Il est possible de d'utiliser d'autre domaines pour obtenir des dispositifs qui fonctionnent de façon similaire. Les principes de similitude électrique et/ou hydraulique en sont des exemples. Constantinesco lui-même faisait la résolution de ses systèmes mécaniques sous la forme de problèmes électrique[18]. La représentation électrique, se prêtant bien aux calculs de réponse en fréquence. Il a aussi documenté la combinaison de mécanismes hybrides mécaniques et hydraulique[3], [5], [20]

3.1 Décomposition fonctionnelle du CCC

Avant de faire la conversion vers d'autres domaines il faut décomposer le CCC en ses composantes fonctionnelles. Ces composantes sont déjà définies dans les autres domaines. La conversion est donc réalisée à partir de similitudes fonctionnelles. L'utilisation des composantes fonctionnelles pour la conversion est conséquente au fait qu'aucune méthode, systématique et bien documenté, de conversion des mécanismes à membrure vers des circuits n'a été trouvées dans les recherche documentaires. Ce manque est explicable par le fait que les branches des circuits sont des constructions à une seule dimension tandis que les membrures sont des constructions à deux dimensions. La possibilité qu'ont les membrures de pivoter et de modifier le comportement du système, tel que vu pour le type B, rend la conversion directe encore plus complexe. Les simplifications effectuées par projection à l'infini des pivots permettent une baisse du nombre de dimension, ce qui facilite la conversion vers un circuit équivalent.

3.1.1 Décomposition en fonctions de base pour le Type-A

Pour le type-A les items suivants ont été retenus :

- source de puissance alternative (vilebrequin)
- rectificateur de sortie
- levier dynamique
- masse (inertance)
- charge

3.1.2 Décomposition en fonctions de base pour le Type-B

Pour le type-B les items suivants ont été retenus :

- source de puissance alternative (vilebrequin)
- rectificateur de sortie
- levier simple
- accumulateur d'énergie potentielle
- charge

3.1.3 Décomposition en fonctions de base pour le Type-C

Pour le type-C les items suivants ont été retenus :

- source de puissance alternative (vilebrequin)
- rectificateur de sortie
- système résonnant (accumulateur d'énergie cinétique et accumulateur d'énergie potentielle)
- charge

3.2 *Circuits équivalents et conversion vers les autres domaines*

La conversion vers les autres domaines a été effectuée à partir de la méthode des circuits équivalents par analogie. L'analogie électrique-hydraulique est utilisé pour convertir vers le domaine hydraulique. La méthode des circuits équivalents par analogie existe et est bien documentée pour un grand nombre de domaines. Lorsque représenté sous cette forme, il est possible de reconstruire physiquement un dispositif fonctionnellement équivalent. Cette conversion est possible puisque le formalisme mathématique est le même. Il est possible de convertir les circuits directement d'un

domaine à l'autre. Le passage par le domaine électrique est fait seulement pour une question pratique puisque cela évite de refaire des théories. Un autre point intéressant est que les outils et méthodes d'analyse des circuits sont très puissants et très bien documentés. Une formation en électricité est donc un atout majeur lorsqu'on performe des conversions de mécanismes.

Dans le domaine électrique les lois de Kirchoff/Norton généralisées permettent de modifier un circuit pour trouver son équivalent avec une source de type différente (courant, tension). Il est possible d'utiliser le théorème de superposition lorsqu'il y a plusieurs sources. Ce sont là deux outils des plus utiles lorsqu'on cherche à convertir les mécanismes. Puisque les calculs se font avec des grandeurs sinusoïdales et en régime permanent il est possible d'utiliser la valeur efficace, tel que dans l'équation (4).

$$A_{eff} = \frac{A_i}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Où,
 A_{eff} Valeur efficace
 A_i Valeur crête

3.2.1 Circuits équivalents des composantes

Pour le convertisseur de couple de Constantinesco, la conversion s'effectue pour chaque composante fonctionnelle. Ces composantes sont le vilebrequin, la diode et la triade.

3.2.1.1 Circuit équivalent du vilebrequin

Le vilebrequin est directement converti vers une source alternative. Cette source peut être une source de tension ou une source de courant. Lorsque le couple est contrôlé c'est l'équivalent d'une source de tension. Lorsque le contrôle de fait sur la vitesse de rotation c'est l'équivalent d'une source de courant. Pour un CCC type A la vitesse du

moteur était la méthode de contrôle. Le vilebrequin est donc remplacé par une source de courant alternative. Pour le convertisseur type B la fréquence est fixe. Pour les types A et C, la source a une fréquence variable. Pour tous les types l'amplitude est constante puisque le bras du vilebrequin ne change pas de longueur.

3.2.1.2 Circuit équivalent de la diode

La diode mécanique demeure une diode évidemment. Une combinaison de différents types de diode peut être utilisée pour simuler les différents états de la sortie.

3.2.1.3 Circuit équivalent de la triade

Ce qui différencie principalement les types de CCC est la triade. La fonction de la triade est de convertir les forces et les déplacements. L'utilisation d'un transformateur pour remplacer la triade est possible. L'utilisation d'un transformateur implique la conversion est effectuée par des masses. Cependant la conversion est due à l'élasticité de la membrure. Il est possible de trouver une combinaison de composantes de circuit qui permettent d'avoir la même fonction que chaque type de CCC.

3.3 Conversion du CCC vers le domaine hydraulique.

Le dispositif CCC (Convertisseur de Couple de Constantinesco) est généralement connu sous la forme d'un mécanisme à membrure. Pour le type C, le principe de fonctionnement est d'augmenter l'énergie dans les composantes du mécanisme. Les mouvements relatifs des membrures font en sorte que la force appliquée sur la membrure de sortie est suffisamment élevée pour forcer le mouvement. Théoriquement si la sortie est complètement bloquée et que le système a très peu de pertes, ce dernier augmentera son énergie interne jusqu'à son maximum. Ce maximum correspond à l'équilibre de l'énergie fournie et des pertes. Il est important de cerner ce maximum pour éviter que certaines composantes se brisent avant de l'atteindre. Dans ce texte, le terme dispositif hydraulique surpresseur (DHS) est utilisé pour le différencier du CCC type C puisqu'il n'y a pas de fonction de conversion de couple. Le DHS est donc un

dispositif qui augmente la force appliquée sur la sortie par l'augmentation de la pression interne à partir de l'énergie accumulée.

3.3.1 Fonctionnement théorique du CCC en configuration surpresseur harmonique

Étudions la conversion du mécanisme CCC sous la forme hydraulique. La puissance du moteur est transférée vers l'accumulateur et vers la sortie. Cette puissance se divise en fonction de la force requise pour déplacer la sortie et le pendule. Dans le cas où la sortie est bloquée toute la puissance est transférée au pendule qui accumule cette énergie. Il faut avoir une fréquence d'oscillation du pendule similaire à la fréquence de l'entrée pour entrer en résonance. Dans la figure 23, la membrure triangulaire qui fait office de lien entre le vilebrequin et la masse est à peu près perpendiculaire à la membrure connectée au vilebrequin. Celle-ci doit être conservée le plus rectiligne possible entre la diode et le pendule afin de minimiser la force présentée à l'entrée. La force appliquée sur la sortie est fonction de la force du vilebrequin et de la force du balancier. Puisque la membrure de moteur est à peu près perpendiculaire au membrures triade et diode la force appliqué sur la diode vient presque entièrement du pendule. Lorsque cette force est suffisamment grande une partie de l'énergie du balancier est transférée vers la sortie lorsque celle-ci entre en mouvement. Ce mouvement se répète et le résultat est un mouvement intermittent à la sortie.

3.3.2 Conversion avec une triade hydraulique

A partir des circuits équivalent il est possible de faire le schéma rudimentaire d'un DHS. À partir de ce schéma il est possible de faire la conversion vers un système hydraulique. Une approximation est faite avec la triade hydraulique. Cette dernière contrairement à la triade mécanique pour laquelle les rapports de force changent avec

l'orientation, ceux de la triade hydraulique sont fixes, ce qui simplifie l'analyse. Pour l'analyse structomatique le script d'une triade (TT-TT-TT) est utilisé.

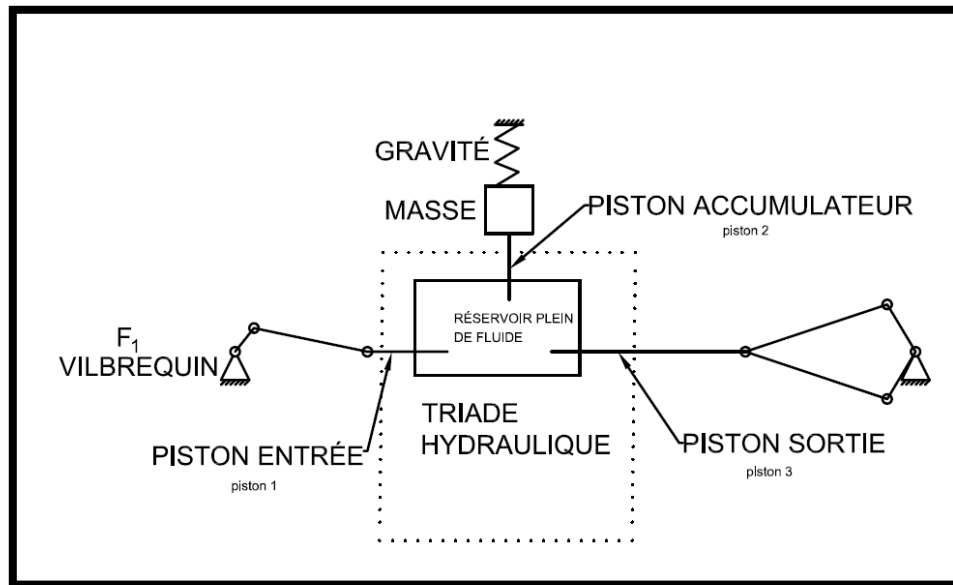


Figure 33 : Conversion partielle du CCC

On remarque que le positionnement des pistons ne modifie pas le fonctionnement du système. La dimension du réservoir ne modifie pas le fonctionnement du système en considérant que le fluide est inélastique. Le réservoir peut être remplacé par des conduites et peut prendre presque n'importe quelle forme. Cela donne une très grande flexibilité de fabrication et de disposition spatiale des composantes.

3.3.3 Modèle inélastique et DHS type A

Avec les observations précédentes, le modèle est reconstruit pour qu'il soit plus compréhensible analytiquement. Le système correspond au schéma en considérant le fluide inélastique.

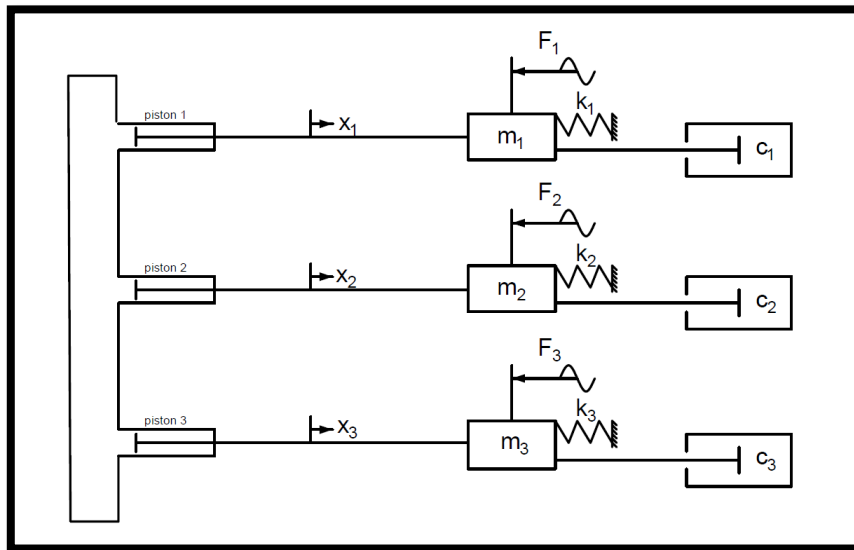


Figure 34 : DHS type A

Ce système hydraulique possède 2 degrés de liberté. Le système est entièrement défini lorsque les positions de deux masses sont caractérisées. Le système ne peut pas osciller lorsque deux masses sont fixés. Il n'y a pas d'accumulation d'énergie.

Ce schéma est l'équivalent hydraulique d'un CCC type A tel que le modèle à levier dynamique

3.3.4 Modèle élastique et CCC type C

Lorsqu'on considère l'élasticité du fluide et des composantes le modèle devient celui de la figure 35. Celui-ci possède un ressort supplémentaire devant la masse m_3 . Ce ressort permet à la masse d'osciller même lorsque les autres masses sont à l'arrêt. Cette masse en oscillation est le dispositif qui emmagasine l'énergie.

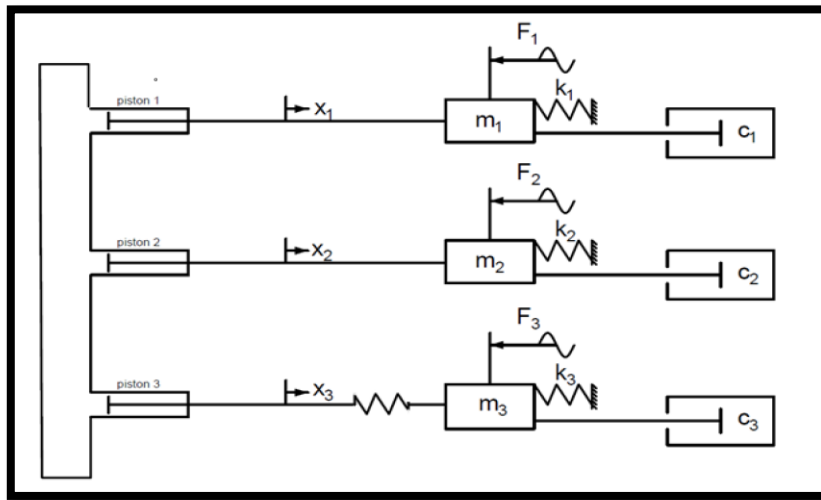


Figure 35 : DHS Type C

Le déplacement de la masse 3 ne peut être défini en fonction de la position des deux autres. La position exacte de la masse 3 ne peut être définie exactement dans le temps puisqu'elle oscille et que ses amplitudes et fréquence varient en fonction des transferts d'énergie. L'amplitude du déplacement de la masse 3 peut être utilisé pour caractériser le système. Cette amplitude est proportionnelle à l'énergie emmagasinée.

Le DHS type C est un système à trois degrés de liberté et la position des masses n'est pas entièrement définies.

Les degrés de libertés sont trois positions. Un des degrés est indéterminé. Il est possible d'utiliser l'amplitude de mouvement de la masse dont la position est indéterminée pour caractériser le système.

Puisque le DHS type C possède 3 degrés de liberté et qu'il est une conversion vers l'hydraulique du CCC, il est possible de supposer qu'une version du CCC type C utilisant la résonance est un système avec 3 degrés de liberté.

3.4 Adaptation du DHS pour Abitibi Géophysique inc.

Abitibi-Géophysique Inc. est une compagnie de prospection géophysique. Il y a certaines situations où les sondes de prospection ne peuvent pas être déplacés par gravité et doivent donc être motorisées. Dans le but d'avoir une solution pour ce type de problème, la compagnie a demandé à l'UQAT d'étudier la faisabilité d'un module pour le déplacement de sondes de prospection dans les trous de forage à faible pente. Après l'étude de la problématique, une recherche documentaire et de recherche de fournisseur, il a été établi qu'un module de déplacement était faisable à condition de trouver une motorisation adaptée.

Parmi les problématiques de la motorisation, se trouve la nécessité d'une transmission pour compenser pour la faible force du moteur. La force du moteur est limitée par l'espace disponible. L'espace disponible rend difficile l'utilisation d'une transmission conventionnelle. La particularité du DHS permettant à la triade hydraulique de prendre plusieurs formes a été entrevue comme une solution possible.

Une étude de conception a été effectuée afin de valider la possibilité de concevoir un DHS dans les conditions du projet. L'alimentation en puissance disponible était une source de tension alternative. L'Utilisation d'une série de bobine simple était prévue comme source oscillatoire. Les bobines directement reliées à la source permettaient d'obtenir une oscillation à fréquence fixe de 60 Hz. Cette source oscillatoire fixe demandait donc l'utilisation d'un convertisseur de type-B ou C. Comme mentionné précédemment, les DHS de type B ne peuvent pas être conçu avec un système de piston simple puisque le ratio de force des membrures de la triade hydraulique est fixe. Le DHS type-A demande une source à fréquence variable. L'utilisation d'une telle source demandait d'ajouter des conducteurs électriques et rendait la logistique plus complexe. Le développement d'un DHS de type C s'est donc imposé. Le premier modèle étudié est montré à la figure 36. Dans la vue en coupe longitudinale de la figure 37, les ressorts

d'accumulation sont en fait des ressorts hydrauliques. Le fonctionnement et la méthode de conception de ce type de ressort ainsi que de la triade est basé sur la méthode de Constantinesco [19].

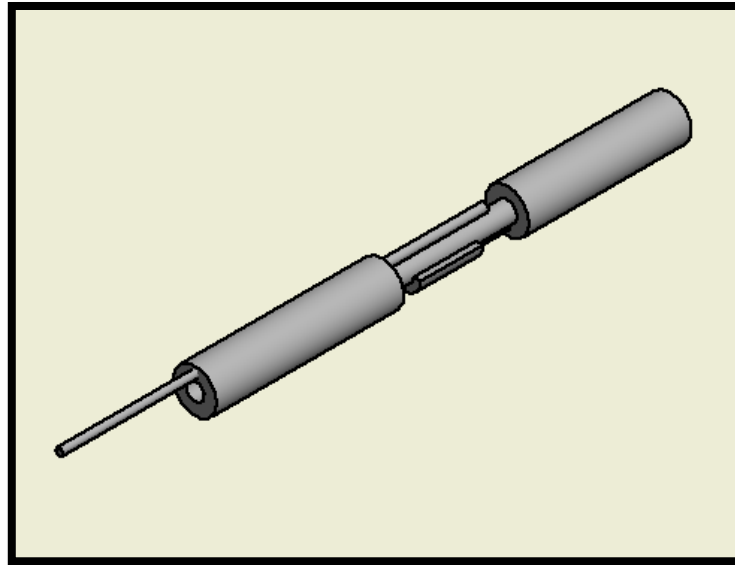


Figure 36 : Vue isométrique du DHS type C

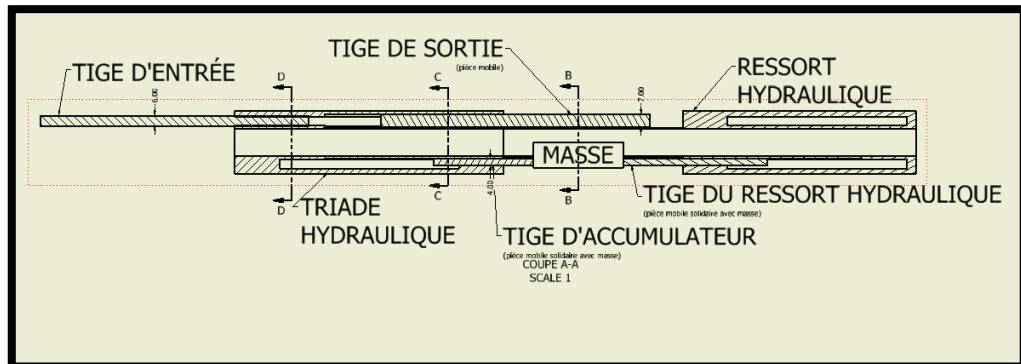


Figure 37 : Vue en coupe longitudinale du DHS type-C

À la figure 38, dans les vues en coupe du DHS, le passage requis pour le câble des sondes de prospection et le diamètre maximal du module rendent difficile l'utilisation

des méthodes habituelles. La flexibilité de forme de la triade hydraulique et des ressort hydrauliques permettent de contourner cette difficulté.

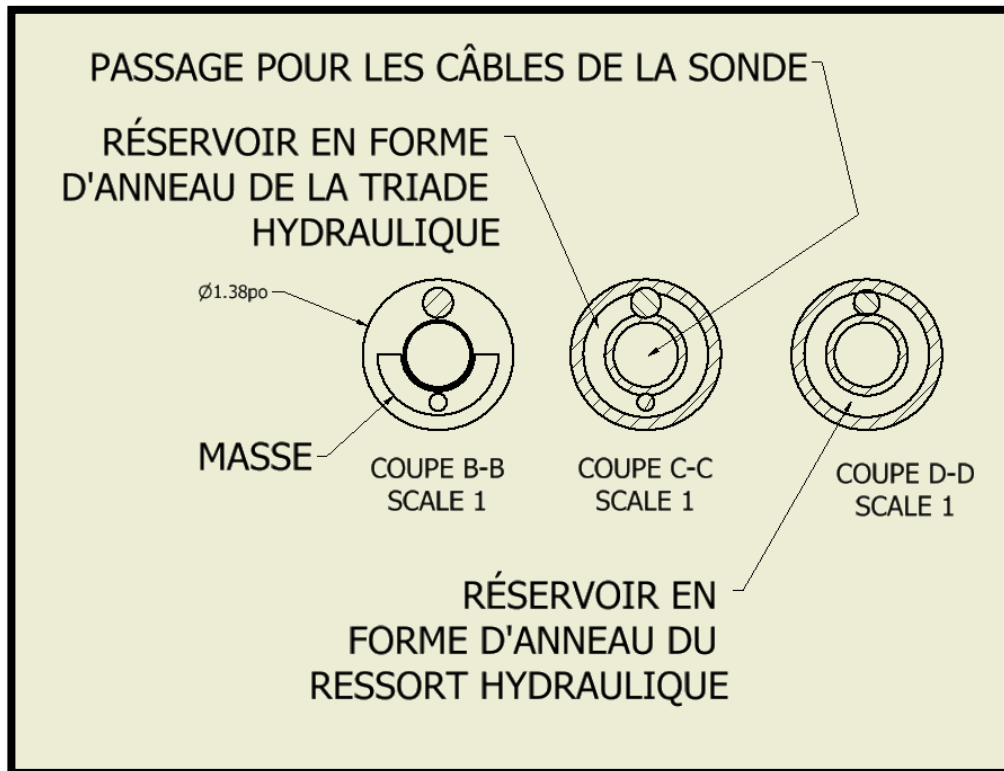


Figure 38 : Vue en coupe DHS type-C

Le développement du DHS Type-C n'a pas été complété. La présence du fluide apportait une nouvelle problématique. Le risque de fuite dû au grand nombre de joint coulissants et le dérèglement du système. Les prospections peuvent se faire à des températures allant de -40C à plus de 80C , les possibilités de fuite sont élevées. Le design a été mis de côté.

Cette idée du DHS a permis de confirmer la possibilité de construire une version hydraulique d'un mécanisme qui utilise le même principe qu'un CCC.

3.5 Conversion du CCC dans le domaine électrique

La conversion dans le domaine électrique du CCC a été explorée. Il a été estimé que certains moteurs électriques sont fonctionnellement des équivalents du CCC. La comparaison avec le CCC s'est faite au niveau fonctionnel seulement. Les similitudes en fonctionnement ont permis d'établir les hypothèses d'équivalence. La recherche de similitudes a été faite sommairement. Une conversion complète du CCC vers des équivalents électriques n'a pas été réalisée. L'exercice de faire la conversion vers le domaine électrique semblait futile puisque des équivalents électriques étaient disponibles et que la théorie des machines électriques est déjà bien couverte par la littérature [21], [22].

Les moteurs électriques ayant des fonctionnalités similaires aux CCC. Ceux-ci ont pris la place du DHS. Cependant les contraintes d'espace citées dans l'utilisation du DHS pour le module de déplacement étaient toujours présentes et l'utilisation de moteur commerciaux était impossible. Le développement d'un moteur électrique adapté est devenu inévitable. Les développements réalisés sont décrits dans le rapport en annexe B.

3.5.1 Moteur à cage d'écureuil et type-A

L'hypothèse est faite que les moteurs à cage d'écureuil sont un équivalent électrique du CCC type-A. Les similitudes sont :

- La variation de la fréquence d'entrée change le couple du moteur
- Le ratio du levier est remplacé par le ratio du nombre de tours de fils dans les enroulements.
- Le ratio est fixe.

3.5.2 Moteur à rotor bobiné et type-AB

Basé sur ces similitudes, il est supposé que les moteurs à rotor bobinés soient un équivalent électrique d'un CCC type-AB. En plus des similitudes citées en 2.8.1, le ratio des forces est ajusté en utilisant une partie de l'énergie de l'entrée.

3.5.3 Bobines de Tesla et CCC type-C

Encore par similitude, il a été établi que les bobines de Tesla sont une version électrique du CCC type-C, les deux étant des accumulateurs d'énergie fonctionnant sur le principe de la résonance.

3.6 *Résumé du chapitre 3*

La conversion fonctionnelle du CCC vers d'autres domaines est possible. Dans le domaine électrique il est possible peut répertorier plusieurs dispositifs fonctionnellement équivalents au CCC. La conversion d'un système à membrure vers un circuit équivalent est complexe dû au fait que les deux systèmes ont des composantes avec un nombre de dimensions différentes. La conversion vers le domaine hydraulique élimine le caractère rigide des membrures et permet une grande flexibilité de design surtout au niveau de l'organisation spatiale des composantes.

CHAPITRE 4: LE CCC TYPE A UTILISÉ DANS LA VOITURE CONSTANTINESCO

Selon les descriptions du fonctionnement de la voiture Constantinesco, un CCC de type A est utilisé. L'utilisateur positionne l'accélérateur et le mécanisme ajuste la vitesse du moteur en conséquence. Il ne faut pas confondre l'accélérateur de la voiture de Constantinesco avec celui des voitures conventionnelles. L'accélérateur des voitures conventionnelles contrôle l'entrée des gaz et influence directement la vitesse rotation du moteur. L'accélérateur de Constantinesco remplissait la fonction de régulateur de vitesse de la voiture (Cruise control). Le système ajustait la vitesse du moteur pour faire correspondre l'énergie requise pour maintenir la vitesse du véhicule avec celle demandée. Le mécanisme de contrôle de la vitesse du moteur ne fait pas théoriquement partie du CCC mais peut y être connecté et/ou insérer.

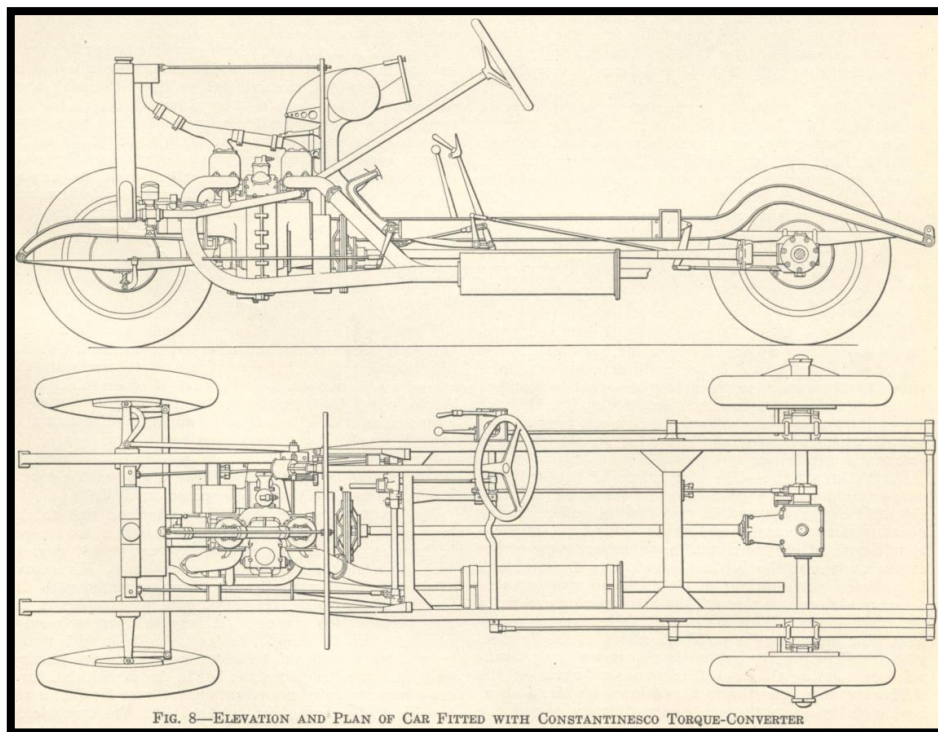


Figure 39 : Élévation et plan du bâti de la Constantinescu

Ce qui n'apparaît pas dans la littérature sur le CCC est qu'un mécanisme supplémentaire est requis pour réguler la vitesse du moteur à combustion. Le mécanisme utilisé devait prendre la forme d'un gouverneur. Contrairement à ce qu'on voit plus couramment, où le gouverneur est connecté sur le moteur pour auto-réguler la vitesse de celui-ci. Il est raisonnable de supposer la présence d'un gouverneur connecté sur la rotation des roues qui régulaient la vitesse du moteur. Une configuration différentielle avec l'accélérateur permet de ralentir le moteur lorsque la vitesse de croisière atteinte ou est supérieure à la vitesse demandée et de l'accélérer pour fournir plus d'énergie lorsque la vitesse de croisière est trop basse. Le mécanisme CCC s'ajustant en fonction du couple de sortie et la vitesse du moteur. La puissance disponible dépendant du régime du moteur. Ce type de régulateur de vitesse a été utilisé en 1908 dans une Peerless (Peerless Motor Car Company) [23].

Le véhicule muni d'un CCC ne peut utiliser le moteur pour freiner à cause de la diode mécanique. À cause de cette même diode mécanique le moteur ne peut être entraîné par le véhicule en mouvement et ne peut donc pas être démarré par compression.

4.1 Exemple de conception d'un CCC type A

À l'époque, puisque les calculateurs n'étaient pas disponibles, la conception d'un CCC devait demeurer assez simple pour l'ingénieur. Cette simplicité relative est supposée valide puisque plusieurs configurations de CCC ont été introduites en quelques années et il semble que Constantinesco et son équipe n'étaient pas les seuls à pouvoir faire les calculs, puisqu'un autre modèle de transmission à membrure qui élimine la diode mécanique, a été conçu dans les mêmes années [1], [24]. Plusieurs approximations sont faites afin de simplifier les calculs et de les rendre possibles sans

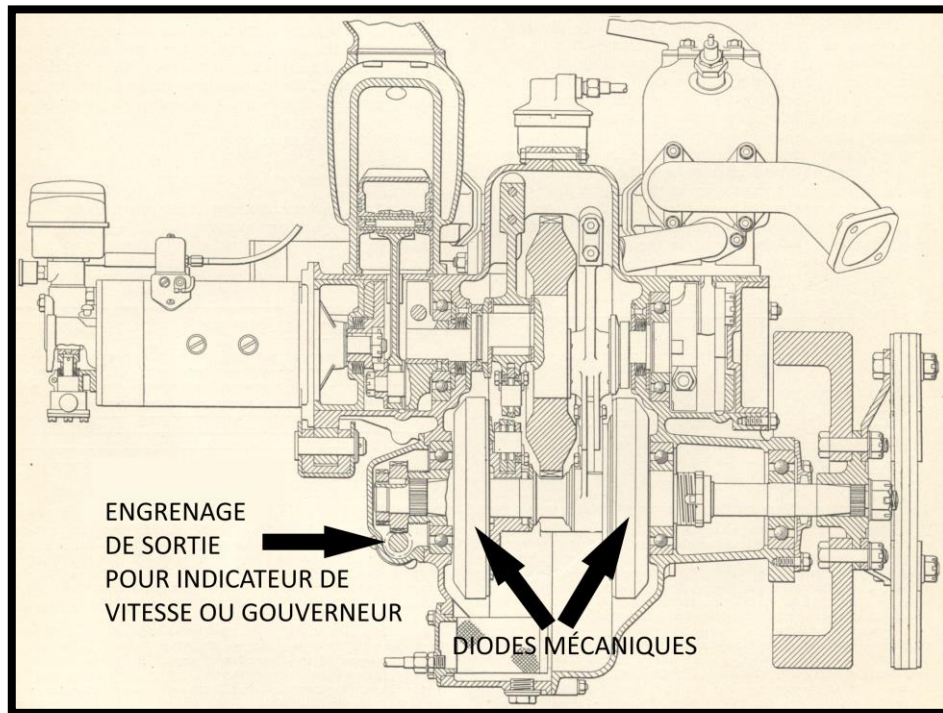


Figure 40 : Vue en coupe du CCC de la Constantinesco [1] avec annotations

l'utilisation de calculateurs (ordinateurs). L'objectif de ces simplifications est de rendre la conception et la fabrication d'une transmission inertielle accessible à ceux qui n'ont pas les connaissances pour effectuer les calculs théoriques. Les formules empiriques obtenues serviront au dimensionnement du mécanisme. Même s'il n'est pas optimisé, un CCC type A conçu avec la méthode présentée devrait être fonctionnel. Le script du calcul mathématique (structomatique) utilisé pour valider les simplifications se retrouve en annexe C.

Les étapes de conception sont les suivantes :

- 1- Caractériser l'utilisation désirée et déterminer la puissance requise
- 2- Sélection du moteur et le caractériser
- 3- Conception du CCC
- 4- Conception du train moteur (moteur-transmission-roue)
- 5- Conception du régulateur de vitesse

- 6- Conception du système de frein
- 7- Revenir aux étapes précédentes si requis

Seules les trois premières étapes seront présentées dans cet ouvrage puisque les autres sont déjà bien couvertes dans la littérature. Les deux premières étapes sont présentées de façon sommaire afin d'obtenir les informations requises pour détailler l'étape 3.

4.1.1 *Caractériser l'utilisation désirée et déterminer la puissance requise*

Cette étape sert à obtenir la puissance requise et la vitesse de croisière idéale du véhicule. La puissance doit être établie au début puisque la conception du CCC est dépendante des caractéristiques du moteur. Le bon fonctionnement du véhicule requiert l'ajustement des composantes. La vitesse de croisière sera utilisée pour le dimensionnement des composantes de la diode mécanique.

La Constantinescu avait été conçues pour être économique. Les performances n'étaient pas un critère premier. Elle a été munie d'un moteur de 5HP (3.73 kW) et un poids de 1792 lbs (814 kg) [1]. Ce qui veut dire que pour passer de 0 à 50 km/h (sa vitesse maximale) elle prenait au minimum 22 secondes, en ignorant toutes les pertes. Elle pouvait cependant rouler sur 35km avec un seul litre d'essence (2,85 L/100km).

4.1.2 *Sélectionner un moteur à combustion et le caractériser*

La sélection du moteur se fait basée sur la puissance requise. Ce que l'on doit obtenir sont les spécifications suivantes du moteur :

- 1- Vitesses de rotation minimale et maximale
- 2- Couple à vitesse au ralenti
- 3- Courbe puissance vs vitesse de rotation
- 4- Courbe couple vs vitesse de rotation pour différents ajustements des gaz (ajustement du gouverneur).

Toutes ces informations se retrouvent dans le graphique puissance couple d'un moteur. La figure 41 montre un exemple d'un tel graphique.

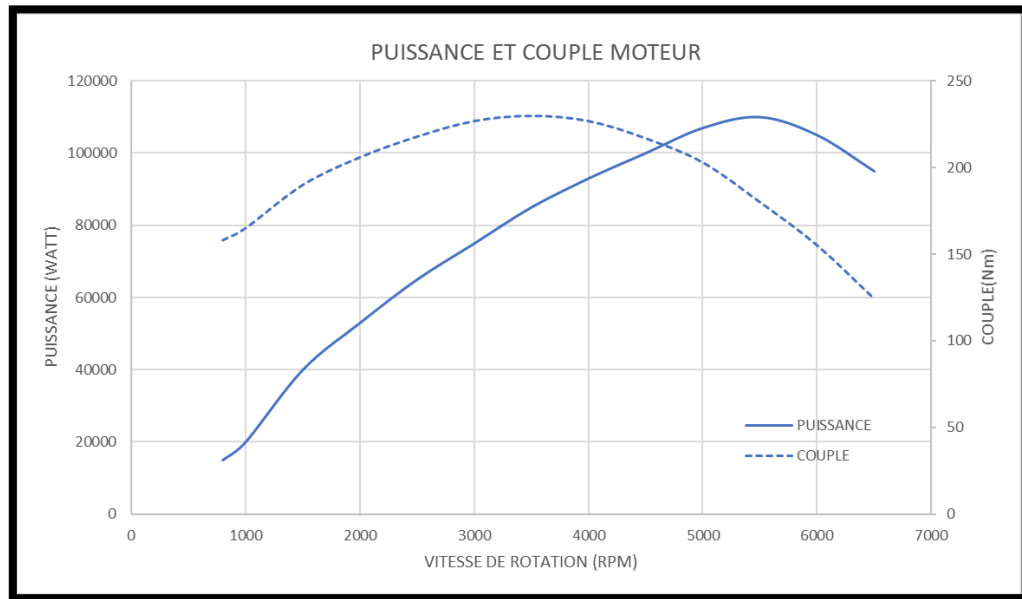


Figure 41 : Courbe puissance et couple vs vitesse de rotation.

4.1.3 Dimensionnement du CCC type A

Les étapes pour le dimensionnement du CCC type A sont les suivantes :

- 1- Amplitude d'oscillation maximale de la sortie et du vilebrequin
- 2- Caractérisation du système d'entraînement de la voiture
- 3- Vitesse de rotation maximale de la sortie
- 4- Amplitude d'oscillation maximale de la masse
- 5- Longueur du balancier
- 6- Amplitude d'oscillation du vilebrequin
- 7- Boucler aux étapes précédentes si requis

Le mécanisme réel utilisé dans la Constantinescu correspond à la figure 42.

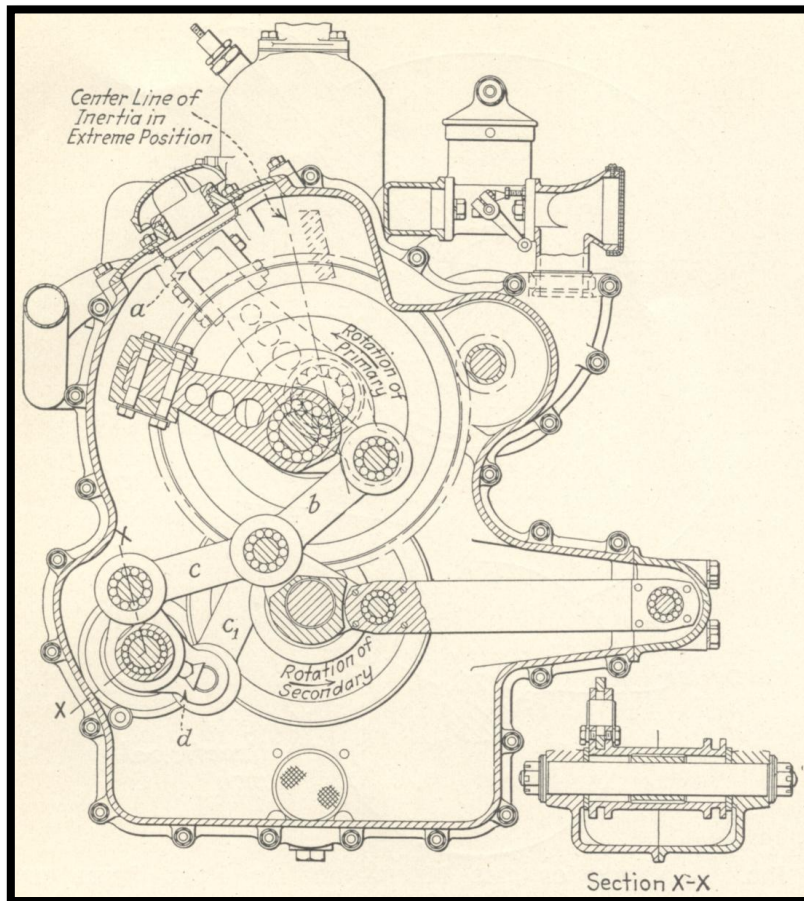


Figure 42 : Vue en coupe du CCC de la Constantinescu[1]

Pour la conception présentée, le convertisseur prendra la forme de la figure 43 afin de conserver la configuration motoélément-triade-motorésistance. L'agencement des membrures est tel que l'utilisation de projection à l'infini des pivots fixes donnera une simplification tel que décrite précédemment.

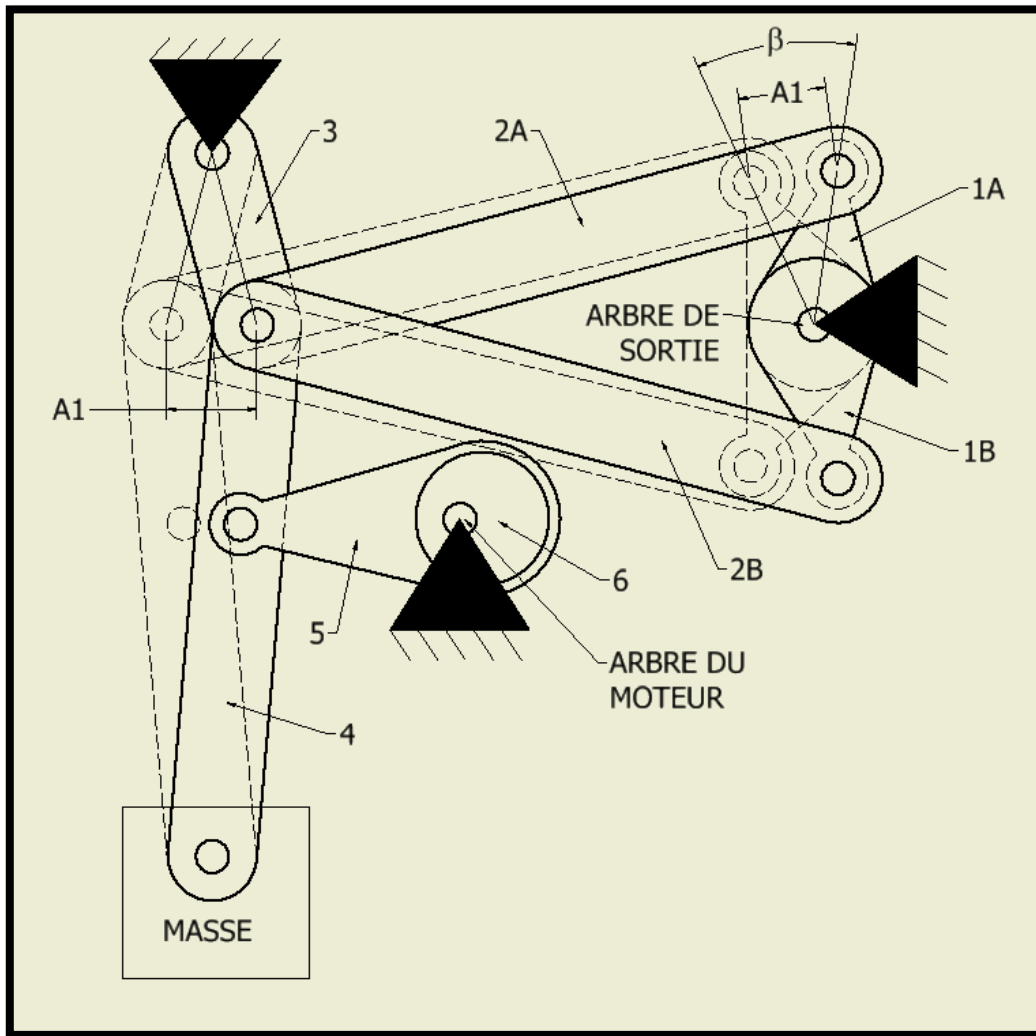


Figure 43 : CCC type A

La figure 44 montre une image tirée d'un brevet de Constantinesco [8]. Il y a une similitude marquée entre le mécanisme développé (figure 43) et celui du brevet (figure 44). La figure 45 est un schéma du CCC de la Constantinesco.

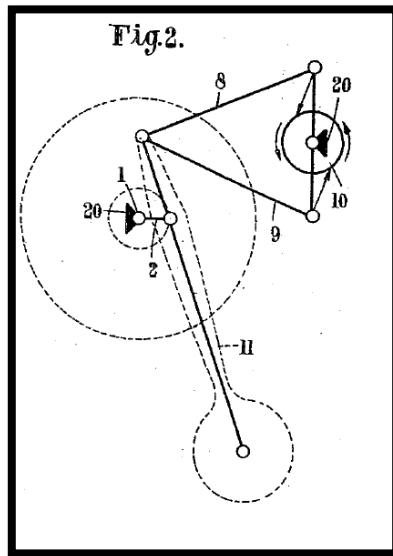


Figure 44 : Image tirée du brevet 1,542,668

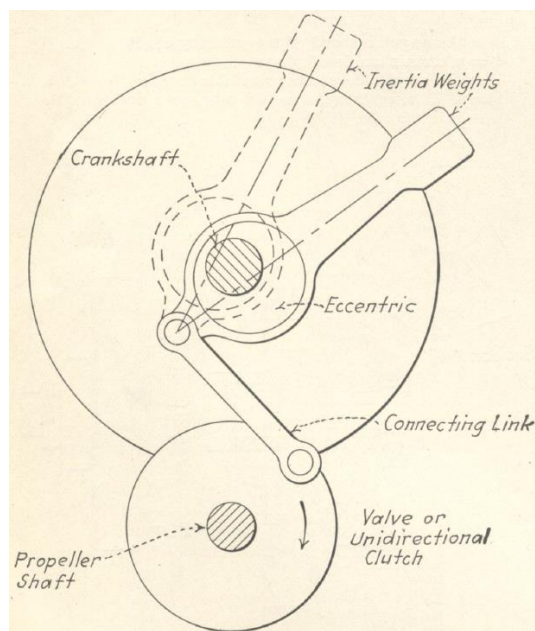


Figure 45 : Mécanisme CCC de la Constantinescu

4.1.3.1 Amplitude d'oscillation maximale de la sortie (A1) et de l'entrée (A2)

À la vitesse de croisière le moteur doit fournir l'énergie minimale pour contrebalancer les pertes. En supposant que les pertes sont minimales la force est aussi minimale et l'approximation est faite que l'oscillation est en sortie libre (figure 8).

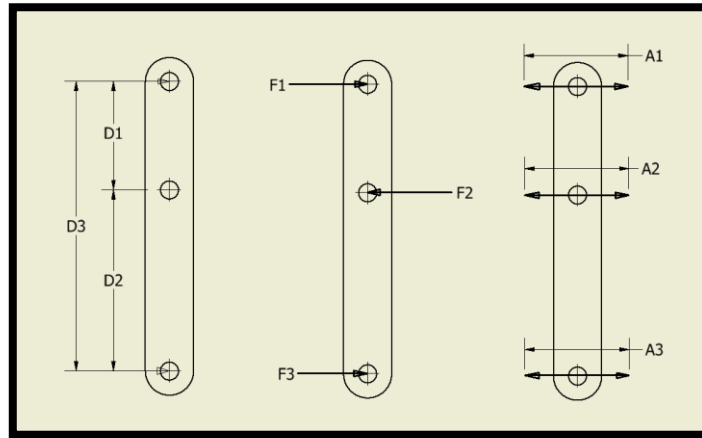


Figure 46 : Simplification du balancier

L'amplitude d'oscillation maximale du pivot de sortie, A1, est déterminée par la longueur de la membrure dans la conception de la diode mécanique. La distance D à la figure 47 doit permettre d'éviter toute interférence mécanique et sera probablement modifié dans les itérations de conception subséquentes. Le schéma de la figure 43 montre le balancier avec les diodes montées à sa sortie.

Avec des déplacements linéaires il est possible d'utiliser les schémas de la figure 46. Un angle de 15 degrés est établi comme étant le maximum pour maintenir la linéarité des déplacements des pivots. Cet angle maximal est appliqué au déplacement de la diode puisque c'est la membrure qui aura la plus grande amplitude de mouvement. L'équation (5) donne l'amplitude du mouvement du pivot du bras de la diode.

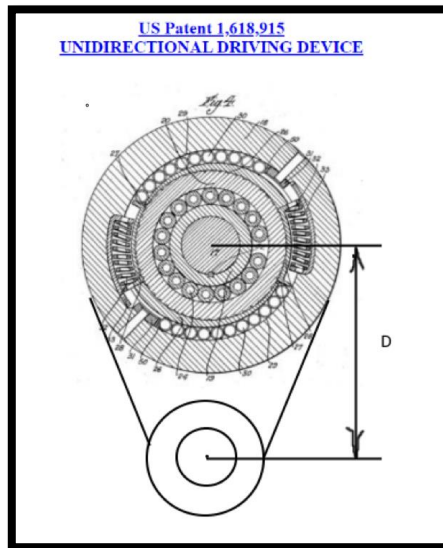


Figure 47 : Image d'une diode mécanique tirée du brevet 1,618,915 avec l'ajout d'un pivot.

$$A_{1max} \cong 2 D \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cong \frac{D}{4} \quad (5)$$

Où,

A_{1max}	Amplitude de mouvement du pivot	[m]
D	Longueur du bras de diode	[m]
β	Angle d'oscillation du bras de la diode (15°)	[degré]

À partir de l'amplitude A_1 il est possible de déterminer l'amplitude maximale de l'entrée A_2 . Le ratio 1/3-2/3 et le triangle de la figure 48 permet d'établir l'équation (6).

$$A_{2max} = \frac{2}{3} A_{1max} = \frac{D}{6} \quad (6)$$

Où,

A_{1max}	Amplitude de mouvement du pivot	[m]
A_{2max}	Amplitude de mouvement du vilebrequin	[m]
D	Longueur du bras de diode	[m]

Cette amplitude donne la longueur du vilebrequin selon l'équation (7).

$$L_{vilebrequin} = \frac{A_{2max}}{2} = \frac{D}{12} \quad (7)$$

Où,

$L_{vilebrequin}$	Longueur du vilebrequin	[m]
A_{2max}	Amplitude de mouvement du vilebrequin	[m]
D	Longueur du bras de diode	[m]

4.1.3.2 Caractérisation du système d'entraînement de la voiture

Le système d'entraînement peut être déterminé ou approximé à ce point. Le but est de déterminer la vitesse de rotation de la sortie du CCC à partir de la vitesse de croisière du moteur.

La vitesse de croisière de la Constantinesco était de 38 mph (60km/h) et le boîtier de transfert arrière possède un ratio de 1 :1 [1]. À partir de la dimension du cylindre qui fait 2.63po[1] et des figure 39 et figure 40, il est possible d'estimer le diamètre des roues à 34po (0.863m). À la vitesse de croisière, l'arbre de sortie du CCC tourne à 1158 rpm. Supposons que le moteur tourne à 3600 tour par minutes à sa vitesse maximale et que la diode mécanique à bille est tel que le brevet #1.618.915 de Constantinesco [25]. La diode oscille à la fréquence du moteur. Le levier de la diode parcourt un angle qui doit demeurer assez petit pour conserver son efficacité et sa linéarité. Supposons 15 degrés. Soit 7,5 degrés de chaque côté de la position où l'angle entre le levier et la membrure d'actionnement est de 90 degrés. Lorsque la diode accroche et que le moteur fournit de l'énergie, la diode et l'arbre de sortie tournent à la même vitesse. La vitesse de déplacement linéaire de la tige du vilebrequin est alors égale au 2/3 de la vitesse de la tige de la diode. À cette vitesse, en se basant sur la figure 48, la vitesse minimale du moteur pour que la diode accroche correspond à l'équation (8).

$$RPM_{moteur} \geq \frac{\frac{2}{3} \left(RPM_{sortie} \frac{2\pi}{360} L_{1B} \right)}{\left(\frac{2}{3} L_{1B} \right)} \frac{360}{2\pi} = RPM_{sortie} \quad (8)$$

Où,

$v_{x_{diode}}$	Vitesse en x requise pour que la diode accroche	[m/s]
RPM_{sortie}	Vitesse de rotation de l'arbre de sortie	[Tour/min]
L_{1B}	Longueur du bras de la diode	[m]
RPM_{moteur}	Vitesse de rotation du moteur	[Tour/min]

À cette vitesse le moteur fournit une puissance nulle à la sortie, puisque la masse du pivot est immobile, il n'y a pas de force appliquée sur la sortie. La vitesse du moteur doit donc être supérieure à celle de la sortie. Prenons arbitrairement un facteur de 2 comme étant le minimum requis. La vitesse de rotation maximale d'un moteur à explosion pouvant facilement atteindre les 3000 RPM, la vitesse du moteur de la Constantinesco était évidemment suffisante.

Lorsque la sélection du moteur est effectuée en premier, pour déterminer la vitesse de rotation du train moteur, un ratio minimum Vitesse maximale du moteur/Vitesse maximale de sortie de 2 doit être conservé. À partir de la vitesse de rotation de l'arbre de sortie, il est possible de déterminer le diamètre des roues et le ratio des différents engrenages, incluant le différentiel. Pour l'économie de carburant, la vitesse de croisière prévue du véhicule doit être ajustée avec la vitesse du moteur avec le plus haut rendement. Cela laisse place à atteindre des vitesses supérieures.

4.1.3.3 Position du pivot du vilebrequin sur le balancier

La position idéale du pivot vilebrequin est déterminée par l'application. Une conception peut se faire pour avoir un système qui permet de fournir la force requise la majorité du temps. Une autre conception peut se faire afin d'avoir un système qui sert

seulement dans le besoin d'une surcharge ou d'un blocage. Il est aussi possible d'utiliser le CCC pour limiter le couple de sortie.

Pour un véhicule, selon Constantinesco, des bons résultats sont obtenus à environ 1/3 de la longueur du levier (ratio 1/3-2/3) [2]. La position du vilebrequin se situe à environ 1/3 de la position de la masse. La position initiale du pivot du vilebrequin sur le balancier est aussi déterminée par les contraintes spatiales de la construction du mécanisme. Il se peut qu'on doive ajuster l'amplitude d'oscillation de la sortie en allongeant le bras de la diode pour permettre la fixation du pivot du vilebrequin. Puisque les forces en jeux sont similaire la dimension D de la diode est utilisé comme distance initiale du pivot.

$$D_1 \cong D \tag{9}$$

Où,

D_1	Distance entre pivot de sortie et pivot du vilebrequin	[m]
D	Longueur du bras de diode	[m]

4.1.3.4 Longueur du balancier (D3)

La longueur du balancier est déterminée à partir ratio établis précédemment. L'angle d'oscillation du balancier se détermine à l'aide du triangle de la figure 48, il est inférieur aux 15 degrés de la diode. La longueur du balancier correspond à l'équation 10.

$$D_1 \cong D \rightarrow D_3 = 3D_1 \tag{10}$$

Où,

D_3	Longueur du balancier	[m]
D	Longueur du bras de diode	[m]

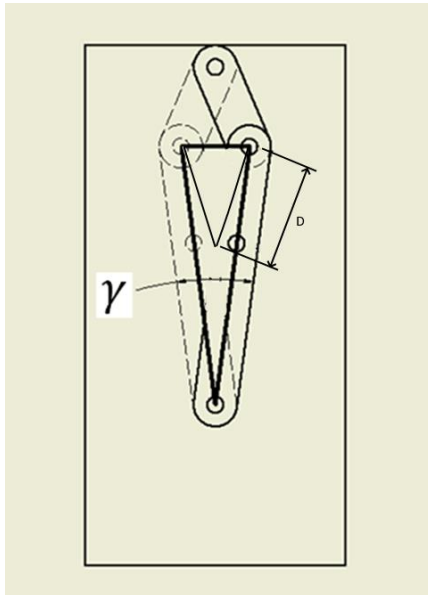


Figure 48 : Triangle pour déterminer la longueur du balancier

4.1.3.5 Énergie disponible par rotation(E)

L'énergie disponible par oscillation fournie par le moteur est déterminée en prenant les valeurs de la courbe de puissance du moteur en Watt en multipliant par 60 secondes et en divisant par la vitesse de rotation correspondante. Le graphique suivant montre l'énergie par rotation du moteur fictif. Il a été construit à partir de la courbe de puissance de la figure 41.

$$E = \frac{60 P_{rpm}}{RPM} \quad (11)$$

Où,

E	Énergie maximale fourni par tour par le moteur	[$J/rotation$]
P_{rpm}	Puissance à la vitesse RPM	[m/s]
RPM	Vitesse de rotation du moteur	[kg]

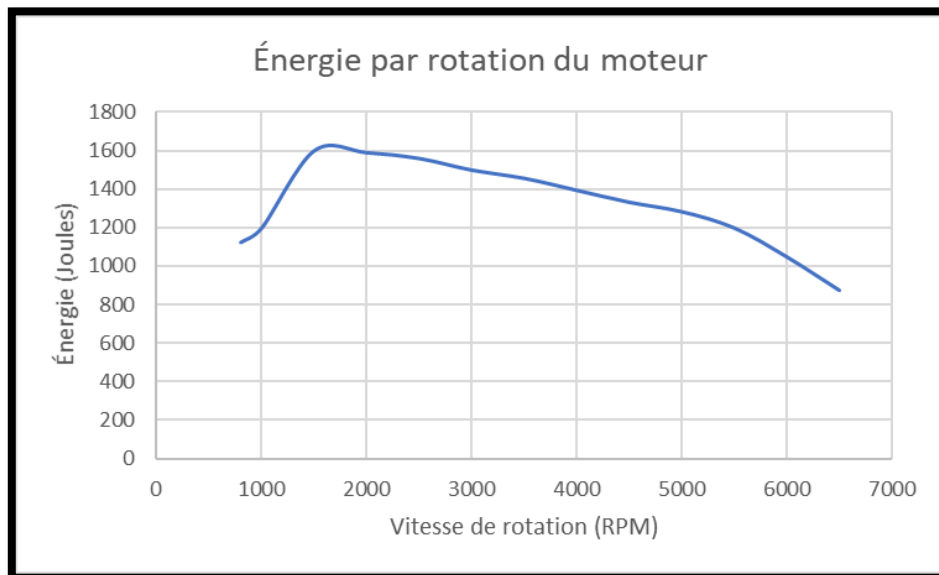


Figure 49 : Courbe énergie par rotation

4.1.3.6 Masse du balancier(m)

L'amplitude d'oscillation de la masse est déterminée par les membrures. Il ne faut pas que l'énergie requise pour forcer la masse en oscillation puisse arrêter le moteur. Dans le cas de blocage de la sortie il faut que le moteur puisse faire osciller la masse sur toute sa plage de vitesse. La masse maximale du balancier est donc déterminée par l'énergie disponible par rotation du moteur. La courbe de la figure 49 permet de déterminer que pour ce moteur, l'énergie minimale par rotation est à la vitesse maximale de rotation.

Le pendule en oscillation doit être accéléré et ralenti. Décrivons l'énergie requise pour un cycle du pendule. Lors du premier quart de l'oscillation, le pendule est accéléré jusqu'à sa vitesse maximale, l'énergie fournie est $\frac{1}{2}mv_{max}^2$. Durant le deuxième quart puisque la masse doit être décélérée le moteur ne fournit pas d'énergie, la masse aide le moteur à tourner, le moteur ne fournit pas d'énergie au pendule. Le troisième est le

même que le premier et le quatrième que le même que le deuxième. Il faut calculer l'énergie requise pour faire osciller la masse et manipuler l'équation pour en déduire la masse maximale selon l'équation (12).

$$E = 2 \frac{1}{2} m v_{3max}^2 = m v_{3max}^2$$

$$m = \frac{E}{v_{3max}^2} \quad (12)$$

Où,

E	Énergie maximale fourni par tour par le moteur	[J/rotation]
v_{3max}	Vitesse maximale de la masse	[m/s]
m	Masse du pendule	[kg]

Il est possible d'obtenir l'accélération de la masse du balancier selon la rotation du vilebrequin. Pour un vilebrequin qui tourne à vitesse constante et une oscillation linéaire de la masse. La figure 46 montre les dimension D1 et D2 ainsi que l'amplitude A2. La figure 50 montre la relation entre la position, la vitesse et l'accélération qui sont décrites par les équations (13), (14) et (15).

$$x_3 = 3 * \left(\frac{D1}{12} \cos(\omega t) \right) = \frac{D_1 \cos(\omega t)}{4} \quad (13)$$

$$\dot{x}_3 = - \frac{D_1 \omega \sin(\omega t)}{4} \quad (14)$$

$$\ddot{x}_3 = - \frac{D_1 \omega^2 \cos(\omega t)}{4} \quad (15)$$

Où,

ω	Vitesse angulaire $\omega = \frac{\pi}{30} \text{RPM}_{\text{moteur}}$	[rad/s]
A_2	Amplitude linéaire de mouvement du pivot	[m]
D_1	Longueur D1 (D1/12 = longueur vilebrequin)	[m]
D_3	Longueur D3	[m]
x_3	Position relative de la masse du pendule	[m]
\dot{x}_3	Vitesse linéaire de la masse du pendule	[m/s]
\ddot{x}_3	Accélération linéaire de la masse du pendule	[m/s ²]
t	Temps	[s]

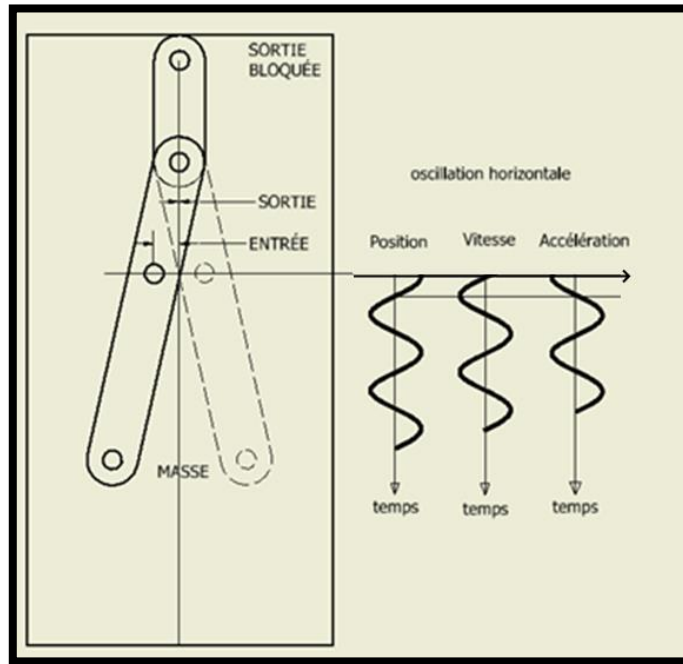


Figure 50 : Calcul de la force en mode sortie bloquée

$$v_{3max} = \dot{x}_{3max} = \frac{D_1 \omega}{4} = \frac{D_1 \pi}{120} \text{RPM}_{\text{moteur}} \quad (16)$$

Où,

Variable	Description	Unités
ω	Vitesse angulaire $\omega = \frac{\pi}{30} \text{RPM}_{\text{moteur}}$	[rad/s]
$\text{RPM}_{\text{moteur}}$	Vitesse de rotation du moteur	[Tour/min]
D_1	Longueur du bras de diode	[J]
v_{3max}	Vitesse maximale de la masse	[m/s]
m	Masse maximale du pendule	[kg]

Les calculs sont effectués en conservant l'oscillation de la masse constante. Pour conserver les approximations linéaires valide il faut conserver l'angle du balancier en dessous de la valeur établie. De cette façon la masse maximale est constante pour tous les ratios. La valeur de la masse s'exprime en fonction des valeurs connues selon l'équation

$$m = \frac{E}{v_{3max}^2} = \frac{14400 E_{min}}{(D_1 \pi \text{ RPM}_{\text{moteur}})^2} \quad (17)$$

Où,

Variable	Description	Unités
E_{min}	Énergie disponible par tour minimum par le moteur	[J/tour]
v_{3max}	Vitesse maximale de la masse	[m/s]
RPM	Vitesse de rotation du moteur à la valeur de E_{min}	[tour/min]
D_1	Vitesse maximale de la masse	[m]

4.1.3.7 Couple maximale à la sortie

Le couple maximal disponible à la sortie est lorsque celle-ci est bloquée. La grandeur de celui-ci se calcul en débutant par l'équilibre des forces sur le balancier.

$$F_1 + F_2 + F_3 = 0 \quad (18)$$

Où,

F_1	Force pivot diode	[N]
F_2	Force pivot vilebrequin	[N]
F_3	Force inertielle	[N]

La force F_3 est dû à l'accélération de la masse. Cette accélération est déterminée par la vitesse de rotation du moteur en tour/minutes. L'accélération est connue et répond à l'équation (15). La figure 50 montre le levier dynamique en mode sortie bloquée. La force F_2 provient du couple du moteur que l'on suppose constant pour une vitesse de rotation donnée et qui est tiré du graphique de la figure 41. La force étant aussi dépendante de l'angle et de la longueur du vilebrequin. En supposant le couple constant sur une rotation complète. La force maximale que le vilebrequin peut fournir correspond à l'équation (19)

$$F_{2\text{max vilebrequin}} = \frac{12 M_{max}}{D_1 \cos(\alpha)} \quad (19)$$

Où,

M_{max}	Couple du moteur	[Nm]
D_1	Longueur du bras de diode	[m]

α Angle de rotation du vilebrequin [degré]

La force requise pour accélérer la masse correspond l'équation (20).

$$F_{2requis} = \frac{3}{2} m \ddot{x}_3 = -\frac{3}{2} m \frac{D_1 \left(\frac{\pi}{30} \text{RPM}_{\text{moteur}} \right)^2 \cos(\alpha)}{4} \quad (20)$$

Où,

m	Masse du balancier	[kg]
D_1	Longueur du bras de diode	[m]
α	Angle de rotation du vilebrequin	[degré]
$\text{RPM}_{\text{moteur}}$	Vitesse de rotation du moteur	[tour/min]

La superposition des tracés des courbes des équations (19) et (20) permet de constater la différence entre la force requise et la force possible. La figure 51 montre qu'à basse vitesse la force requise pour accélérer la masse est beaucoup plus basse que la force que peut produire le moteur. Dans le graphique l'hypothèse est faite que la force de freinage du moteur est la même que la force du couple ce qui n'est pas réaliste.

À haute révolution, comme dans la figure 52, la force requise sur le pivot du vilebrequin pour faire osciller la masse augmente et peut dépasser la force que le couple du moteur peut possiblement fournir. Dans ce cas le moteur ne pourra pas atteindre cette vitesse de rotation. Il ralentira jusqu'à ce que la vitesse permette au moteur d'appliquer la force requise. S'il n'y a pas de vitesse qui permettent cet équilibre le moteur ralentira jusqu'à s'arrêter. La correction de ce problème se fait en diminuant la longueur du vilebrequin ou en diminuant la masse du balancier.

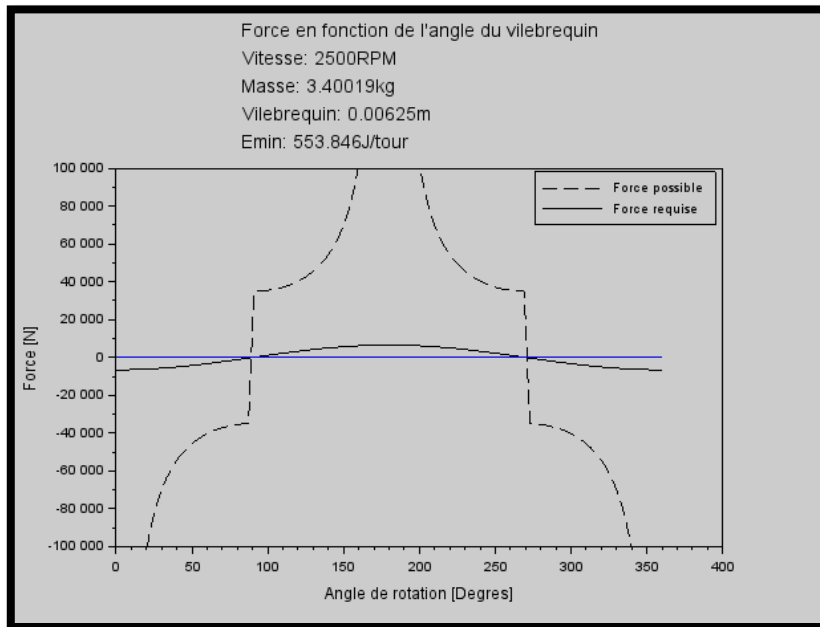


Figure 51 : Forces vs angle de rotation

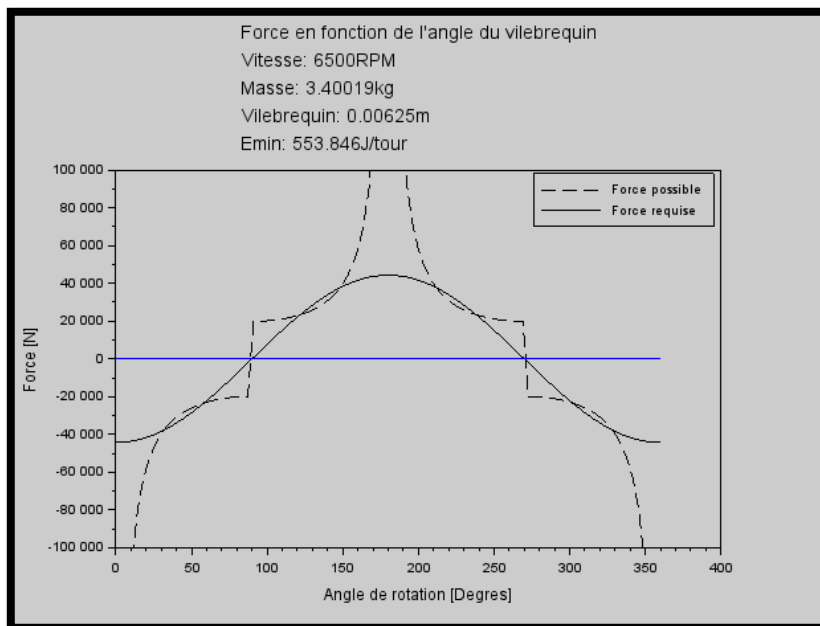


Figure 52 : Forces vs angle de rotation

En mode sortie bloquée la vitesse de la sortie (v_1) est nulle. En utilisant la relation 1/3-2/3 des pivots et de l'équilibre des moments, la force F_1 appliqué sur le pivot de sortie correspond à l'équation (21).

$$F_1 = 2 F_3 = \frac{m D_1 \cos(\alpha)}{2} \left(\frac{\pi}{30} \text{RPM}_{\text{moteur}} \right)^2 \quad (21)$$

Où,

F_1	Énergie minimale fournie par tour par le moteur	[J]
F_3	Vitesse maximale de la masse	[m/s]
m	Masse maximale du pendule	[kg]
α	Angle de rotation du vilebrequin	[degré]

Les graphiques des figure 53 et figure 54 montrent l'allure de la force maximale appliquée par le pendule sur la sortie. Ces valeurs sont avec la sortie bloquée et le moteur à une vitesse fixe. L'utilisation du plus petit ratio possible sur la position des pivots du pendule donnera le plus grand couple de sortie. Il ne garantit cependant pas un bon transfert de puissance. Une comparaison des graphiques des figure 53 et figure 54 montre que pour le CCC type A, la vitesse de rotation du moteur à un grand impact sur la force maximale appliquée sur la sortie.

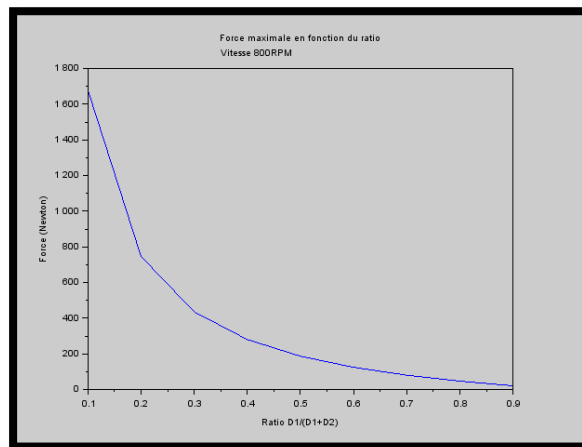


Figure 53 : Force max appliquée à la sortie du balancier à basse vitesse

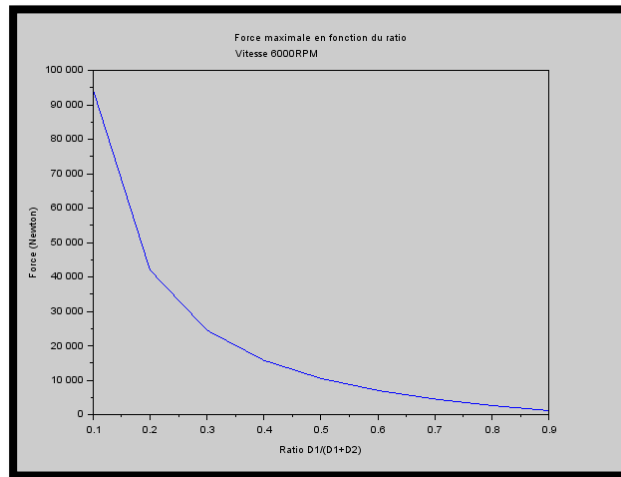


Figure 54 : Force max appliquée à la sortie du balancier à haute vitesse

Le couple de sortie est l'application de la force F_1 sur le bras de la diode mécanique. Le couple maximal pour chaque vitesse correspond à l'équation (22).

$$M_1 = F_1 D_1 = \frac{m D_1^2}{2} \left(\frac{\pi}{30} \text{RPM}_{\text{moteur}} \right)^2 \quad (22)$$

Où,

M_1	Couple de sortie	[Nm]
F_1	Force appliquée par le levier sur la diode	[N]
m	Masse du pendule	[kg]
D_1	Longueur du bras de la diode	[m]
$\text{RPM}_{\text{moteur}}$	Vitesse de rotation du moteur	$\left[\frac{\text{tour}}{\text{min}} \right]$

4.1.4 Energie transmise

Plusieurs paramètres ont été déterminées avec la sortie bloquée. Pour que le système fonctionne, il faut cependant qu'il y ait un déplacement de la sortie du balancier. Ce déplacement combiné à la force appliquée donnera le travail effectué. Prenons par exemple le graphique de la force appliquée sur la sortie à la vitesse ralentie

du moteur à combustion. Supposons que la force requise pour faire tourner la sortie est représentée par les ligne horizontales. Lorsque le moteur est à bas régime la force maximale appliquée n'est pas suffisante. Lorsque la vitesse du moteur à combustion augmente la force appliquée augmente elle aussi. Le travail effectué correspond à la force appliquée multipliée par la distance parcourue par la sortie du balancier.

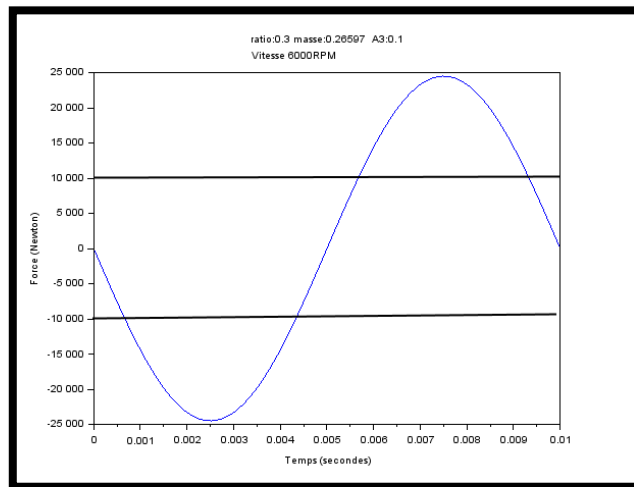


Figure 55 : Force appliquée à la sortie du balancier à haute vitesse

Lors du transfert de puissance le système est en configuration sortie partiellement bloquée. La force présentée dans les graphiques précédent n'est pas adéquate puisque la sortie est en déplacement. Il faut soustraire la vitesse linéaire de la sortie de la vitesse linéaire de l'entrée du vilebrequin. En reprenant le calcul, le résultat est la force appliquée sur la sortie. Cette soustraction directe étant possible dû aux contraintes utilisées pour linéariser les mouvements.

La distance parcourue par la sortie du balancier est déterminée par la vitesse du véhicule puisque pendant le transfert de puissance elle est solidaire avec la sortie des diodes. Le temps où la force est supérieure à la force requise est ensuite déterminé. Multiplier la vitesse de la sortie du balancier par ce temps donne la distance parcourue par la sortie. L'énergie fournie vers la sortie correspond à l'équation

$$\text{Énergie fournie} = F_1 \psi D_1 \quad (23)$$

Où,

F_1	Force appliquée par le levier sur la diode	[N]
ψ	Angle de déplacement de la diode	[rad]
D_1	Longueur du bras de la diode	[m]

4.1.5 Calculs de résistance des pièces

Une fois le dimensionnement de longueur des membrures complété, il faut faire les calculs de résistance des membrures. Cette partie ne sera pas explicite puisque le sujet est déjà bien couvert. Dans ce cas les calculs de contrainte dans les membrures peuvent être effectués à l'aide d'une analyse numérique afin d'obtenir les forces et réactions en jeu dans les membrures [10].

4.2 Résumé du chapitre 4

La conception sommaire présentée montre que le convertisseur de couple type A peut être conçu de manière assez simple. Il est possible de faire la majorité du dimensionnement basé sur la longueur du bras de la diode mécanique. Évidemment l'optimisation du CCC permettra d'avoir de meilleures performances et/ou un meilleur rendement. Aucune allusion n'est faite supposant que la méthode de conception présentée est celle qui était utilisée par Constantinesco. L'objectif étant de démontrer le raisonnement pour la conception du CCC type-A. Les hypothèses simplificatrices permettent une partie de la simplification de la conception. L'analyse est aussi plus simple lorsqu'on utilise un seul des principes de fonctionnement.

La conception présentée permet de déterminer les longueurs et positions des différentes composantes de cette transmission. Ce dimensionnement n'est qu'une des étapes de la conception complète d'une transmission de type CCC.

CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet de maitrise, il a été possible de constater que le convertisseur de couple de Constantinesco est en fait une famille de mécanisme à membrure. Les membres de cette famille de mécanisme fonctionnent à partir d'une combinaison de principes qui ont été catégorisé:

- Type A : effet levier dynamique
- Type B : effet levier positionnel
- Type C : effet d'accumulation d'énergie

Il a été constaté qu'il est possible d'utiliser ces principes significatifs séparément pour reproduire le fonctionnement d'un CCC. Ces principes et donc les types, sont concurrents pour toutes les configurations de CCC. Leur participation peut cependant être suffisamment marginale pour être négligée. Le CCC est simple mécaniquement et assez simple conceptuellement lorsqu'on utilise une configuration qui utilise un seul des principes de fonctionnement. Tenir compte de tous les phénomènes simultanément est très complexe et devient rapidement prohibitif analytiquement, nécessitant l'utilisation de calculateurs et de méthode de calcul itératives. Cette complexité apparait particulièrement prononcée pour les combinaisons avec les types B et C.

Dans la conception d'un dispositif surpresseur hydraulique, il a été observé que les principes de fonctionnement du CCC peuvent être étendu vers d'autres domaines. Ces dispositifs sont utilisés fréquemment de nos jours. Même si leurs développements n'est pas dû à l'œuvre de Constantinesco, cela permet de constater que Constantinesco avait une maitrise hors du commun des phénomènes vibratoires.

Plusieurs simplifications sont possibles afin de conserver le niveau mathématique suffisamment bas pour éviter l'utilisation de calculateur. Dû au grand nombre de

brevets et de modèles conçus en quelques années, il devait être possible de faire la conception de base d'un CCC assez rapidement et de manière théorique. L'optimisation et le balancement de ceux-ci devait représenter le défi principal. De nos jours avec les calculateurs cette optimisation est beaucoup plus accessible. Les méthodes d'optimisation utilisées sont souvent itératives, elles ont besoin d'un point de départ. La méthode de conception du CCC type A présentée pouvant servir à la conception de ce modèle de départ non-optimisé.

Pour valider les résultats des simplifications elles ont été comparées avec des simulations. Les calculs de structomatique ont été réalisés à l'aide du logiciel Scilab. Certains dessins et simulations ont été réalisées à l'aide des versions éducationnelle des logiciel Inventor et Solidworks. D'autre modélisations et dessins ont été réalisés avec Alibre Design.

Les objectifs principaux ont été partiellement atteints. La communication entre confrères qui travaillent sur le CCC sera plus aisée puisque des types de fonctionnement ont été identifiés. Cependant le processus de conception utilisé par l'ingénieur G. Constantinescu n'a pas été complètement cerné puisqu'il demeure encore des parties nébuleuses dans la façon qu'il utilisait la conversion vers des circuits électriques. Une méthode de synthèse des mécanismes du CCC avec des moyens mathématiques modestes a été établie pour un seul des principes de fonctionnement. Elle répond à une seule configuration et manque de généralité. Elle permet tout de même d'obtenir un mécanisme de départ pour un CCC de type A.

Les objectifs spécifiques ont été atteints. Les parties fonctionnelles essentielles du convertisseur ont été identifiées et leur fonction a été établie. Le mutisme fonctionnel de la triade a pu être observé. La conversion vers d'autres milieu ou domaine a été réalisée. Une méthode de conception élémentaire a été établie. Elle permet d'obtenir un modèle qui constitue une solution viable pour des essais. Une version utilisable dans

le projet d'Abitibi-Géophysique a été suggérée même si elle n'a pas été retenue. Il a été démontré que l'inertie n'est pas le seul phénomène exploité dans les CCC.

Pour les développements futurs des CCC, une méthode détaillée de conception pour chacun des types pourrait être développée. Un fois les méthodes établies et le fonctionnement de chaque type bien détaillés, la conception de systèmes CCC à types combinés et chevauchant plusieurs domaines sera plus accessible.

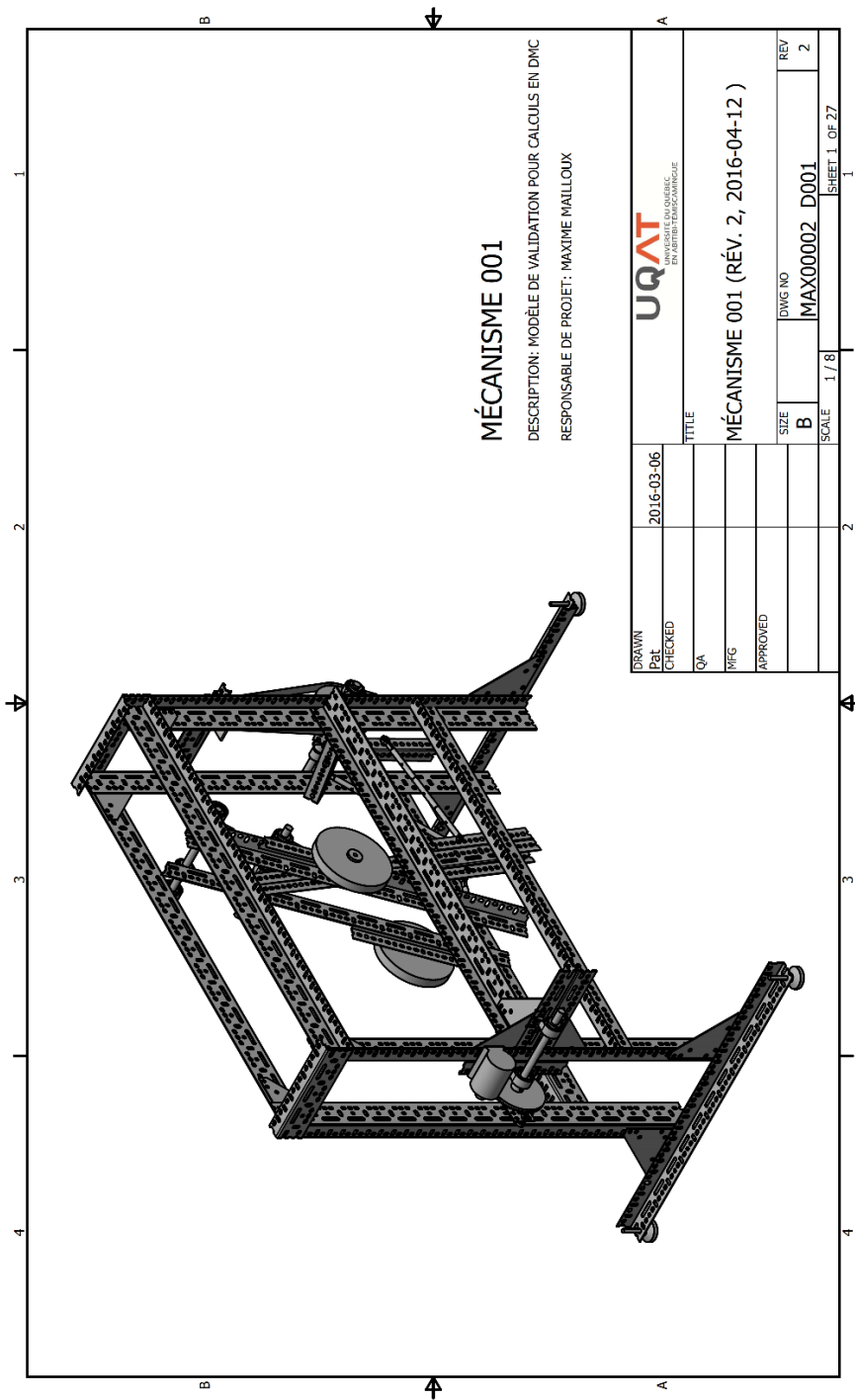
BIBLIOGRAPHIE

- [1] R.K. Jack, « The Constantinesco Torque-Converter », *SAE Trans.*, vol. 22, p. 171-181, 1927.
- [2] G. Constantinesco, « THE TORQUE CONVERTER », *J. R. Soc. Arts*, vol. 75, n° 3866, Art. n° 3866, 1926.
- [3] G. Constantinesco, « Power transmission », 1,545,401, 26 janvier 1924
- [4] G. Constantinesco, « Power transmission », 1,550,505
- [5] G. Constantinesco, « Power Transmission », 1,569,719
- [6] G. Constantinesco, « Power Transmission », 1,582,734
- [7] G. Constantinesco, « Method and apparatus for transmitting power from a steadily rotating shaft to a driven shaft », 1,525,269, 23 février 1923
- [8] G. Constantinesco, « Method and mean of transmitting power », 1,542,668, 26 juin 1922
- [9] Virgil Petrescu *et al.*, « George (Gogu) Constantinescu », *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, n° 4, p. 965-979, déc. 2017.
- [10] M. Mailloux, « Investigation numérique portant sur la dynamique des mécanismes β à plusieurs degrés de mobilité : Application au convertisseur de couple de Constantinesco », Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Canada, 2017.
- [11] William Terry Lester, « Infinitely Variable Transmission Utilizing Oscillating Torque », avr. 2005, p. 15.
- [12] Ranjit Vasant Rajale, Akolkar C.S, Gaikwad S.P, et Raut S.D., « INFINITELY VARIABLE TRANSMISSION SYSTEM USING OSCILLATING TORQUE », Ahmednagar, févr. 2019, p. 422-426.
- [13] Amarsinh A. Shinde et Subim N. Khan, « Modeling, Design and Development of Infinitely Variable Transmission System », *IJSRD - Int. J. Sci. Res. Dev.*, vol. 4, n° 3, p. 106-109, 2005.
- [14] Christophe Everarts, Bruno Dehez, et Renaud Ronsse, « Novel Infinitely Variable Transmission Allowing Efficient Transmission Ratio Variations at Rest », Hamburg, Germany, oct. 2015, p. 5844-5849.
- [15] Amarsinh A. Shinde et Subim N. Khan, « Performance of Infinitely Variable Transmission System Based on Constantinesco Torque Converter », *Int. Eng. Res. J.*, p. 264-270.
- [16] M. Éné, *Introduction à la théorie des mécanismes*, Fégalma. 2014.
- [17] Dr.Ing. Ioan I. Pop, *Tratat de teoria sonicitatii*. Performantica, 2006.
- [18] G. Constantinesco, « THE TORQUE CONVERTER », *J. R. Soc. Arts*, vol. 75, n° 3866, p. 148-177, 1926.
- [19] G. Constantinesco, *Theory of wave transmission, 2nd ed.* 1922.

- [20] G. Constantinesco, « Pump », 1,570,554
- [21] I. Boldea et S. A. Naser, *LINEAR MOTION ELECTROMAGNETIC SYSTEMS*. John Wiley & Sons, Incorporated, 1985.
- [22] A. E. Fitzgerald et S. Umans, *Electric Machinery 5th*. 1990.
- [23] « Governor (device) », *Wikipedia*. 15 juin 2021. Consulté le: 2 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur:
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Governor_\(device\)&oldid=1028716276](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Governor_(device)&oldid=1028716276)
- [24] E.W.Rohrbacher, « Variable transmission or torque converter », 1,767,311, 24 juin 1930
- [25] G. Constantinesco, « Unidirectionnal driving device », 1,618,915

ANNEXE A: DESSINS DU BANC D'ESSAI

L'annexe A présente le banc d'essai ayant servi à faire l'expérimentation de mécanismes CCC. Puisqu'il a été conçu et construit au début de l'étude des CCC, il avait été conçu pour être facilement modifiable.



MÉCANISME 001

DESCRIPTION: MODÈLE DE VALIDATION POUR CALCULS EN DMC
 RESPONSABLE DE PROJET: MAXIME MAILLOUX

DRAWN	2016-03-06						
Pat							
CHECKED							
QA							
MFG							
APPROVED							
TITLE		MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)					
DWG NO		B		MAX00002		D001	
REV		2					
SCALE		1 / 8				SHEET 1 OF 27	

1	2	3	4																																																
B			A																																																
<p>NOTE GÉNÉRALES:</p> <ul style="list-style-type: none"> - LES DIMENSIONS SONT EN POUCES SAUF INDICATIONS CONTRAIRES - LES PIÈCES DOIVENT ÊTRE PROPRES ET EXEMPTES DE BORDS COUPANTS. - LES PIÈCES PORTANTS LE NUMÉRO DE MCMASTER AL NSI QUE CELLES DÉBUTANT AVEC UN "5" NE FONT PAS PARTIS DES TRAVAUX D'USINAGE ET/OU D'ASSEMBLAGE - LE SYSTÈME COMPORTE DES PIÈCES MOBILES POUVANT ENTRAINER DES BLESSURES SÉRIEUSES, UNE PROCÉDURE DEVRA ÊTRE MISE EN PLACE AFIN D'ÉVITER LES ACCIDENTS - ÉTANT DONNÉ LE CARACTÈRE TEMPORAIRE DU DISPOSITIF L'UTILISATION D'UN PÉRIMÈTRE DE SÉCURITÉ ÉST SUGGÉRÉ À LA PLACE D'UN GARDE. - S'ASSURER QUE LES PIÈCES NE SONT PLUS EN MOUVEMENT ET QUE L'ALIMENTATION EST COUPÉE AVANT DE FAIRE DES MANIPULATIONS SUR LE SYSTÈME - NE PAS LAISSER LE DISPOSITIF EN FONCTIONNEMENT SANS SURVEILLANCE 																																																			
<p>LÉGENDE DE NUMÉROTATION</p> <p>AXXX: ASSEMBLAGE DXXX: DESSIN PXXX: PIÈCES FABRIQUÉE SXXX: PIÈCES STANDARD OU PAR MANUFACTURIER</p> <p>LES NUMÉROS DES PIÈCES NE SONT PAS ORDONNÉS (EN ORDRE CROISSANT ET CONSÉCUTIFS)</p>																																																			
<p>NOTES GÉNÉRALES</p>																																																			
<table border="1"> <tr> <td>DRAWN</td> <td>2016-03-06</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Pat</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CHECKED</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>QA</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MFG</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APPROVED</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">TITLE</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>DWG NO</td> <td>REV</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>MAX00002</td> <td>D001</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">SCALE</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">SHEET 2 OF 27</td> </tr> </table>				DRAWN	2016-03-06			Pat				CHECKED				QA				MFG				APPROVED				TITLE				MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)				SIZE	DWG NO	REV		B	MAX00002	D001	2	SCALE				SHEET 2 OF 27			
DRAWN	2016-03-06																																																		
Pat																																																			
CHECKED																																																			
QA																																																			
MFG																																																			
APPROVED																																																			
TITLE																																																			
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)																																																			
SIZE	DWG NO	REV																																																	
B	MAX00002	D001	2																																																
SCALE																																																			
SHEET 2 OF 27																																																			

QTE		LISTE DE PIÈCES	
		NUMERO DE PIECE	
6	MAX00002	S009	BOULON 3/8" NC
2	MAX00002	P001	tube mecanique-manchon roulement
2	MAX00002	P002	fer plat - levier du manchon
4	MAX00002	P003	tige Chrome - arbre principal
1	MAX00002	P004	plaque - disque friction
1	MAX00002	P005	tm - manchon
1	MAX00002	P006	tm - manchon
1	MAX00002	P007	fer plat - levier du vibrequin
1	MAX00002	P008	tm - manchon
1	MAX00002	P009	plaque - disque pouille
1	MAX00002	P012	moteur - moteur
14	MAX00002	P013	tube 1/4" XH
17	MAX00002	P014	tige fileté - membrure
2	MAX00002	P015	pesée - pesée
2	MAX00002	P016	attache - pesée
1	MAX00002	P017	BANDE MÉTALLIQUE (ATTACHE)
1	MAX00002	P018	CORNIÈRE
1	MAX00002	P019	CORNIÈRE
1	MAX00002	P020	FER PLAT
1	MAX00002	P021	TIGE FILETÉE 3/8" NC
100	MAX00002	S003	flange nut 5116 - mcmaster94612A103
100	MAX00002	S004	flange bolt 5116 - mcmaster2929A249
6	MAX00002	S005	ball joint 5116 - mcmaster6064SK431
			UTILISER BALL JOINT 3/8"
11	MAX00002	S006	bearing 314 - mcmaster5913K630
4	MAX00002	S007	patte - mcmaster60855K76
6	MAX00002	S008	SET SCREW - 1/4-20 UNC x 0,38
11	MAX00002	S101	corner plate - mcmaster4664T220
7	MAX00002	S131	angle simple 1pi - mcmaster4664T302
2	MAX00002	S133	angle simple 3pi - mcmaster4664T510
4	MAX00002	S141	angle double 1pi - mcmaster4664T303
4	MAX00002	S143	angle double 3pi - mcmaster4664T630
4	MAX00002	S151	angle triple 1pi - mcmaster4664T304
9	MAX00002	S154	angle triple 4pi - mcmaster4664T311
2	MAX00002	S200	one way bearing 34x1 - mcmaster 2489K600
4	MAX00002	S210	needle bearing 34x1 - mcmaster 5905K270
3	MAX00002	S220	thrust bearing 34x1 1H - mcmaster 5909K330
6	MAX00002	S221	rondelle roulement - diode

LISTE DE MATÉRIEL

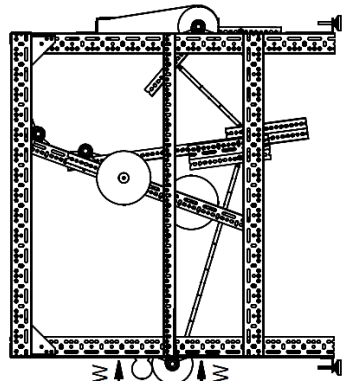
DRAWN	2016-03-06
Pat	
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	DWG NO
B	MAX00002
SCALE	D001
REV	2



LISTE DE PIÈCES	
ARTICLE	NUMERO DE PIECE
1	MAX00002 A001 frame
2	MAX00002 A002 membre 3
3	MAX00002 A102 systeme diode
17	MAX00002 A005 membre
18	MAX00002 A006 membre
22	MAX00002 A006 balancier
24	MAX00002 P012 moteur - moteur
25	MAX00002 A105 poulie
26	MAX00002 A104 vibrequin
27	MAX00002 A106 COURROIE FREIN

ITEM A000	
ASSEMBLAGE GÉNÉRAL	
UQAT <small>UNIVERSITÉ QUÉBÉCOISE EN ARTS, TECHNIQUE ET SCIENCE</small>	
DATE	2016-03-06
DRAWN	Pat
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	DWG NO
B	MAX00002 D001
SCALE	1/8
REV	2

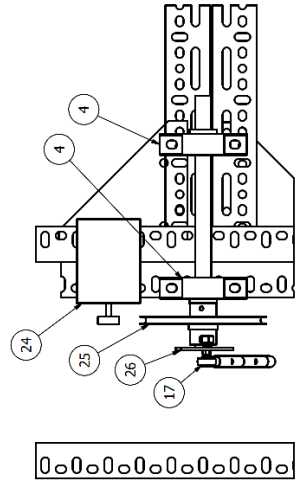
ARTICLE		QTE		LISTE DE PIECES	
				NUMERO DE PIECE	
1	1	MAX00002	A001	frame	
2	1	MAX00002	A002	membrane 3	
3	1	MAX00002	A102	systeme diode	
4	6	MAX00002	S006	bearing 314 - mcmaster5913K630	
5	2	MAX00002	S151	angle triple 1pi - mcmaster4664T304	
7	1	MAX00002	S154	angle triple 4pi - mcmaster4664T311	
8	2	MAX00002	S141	angle double 1pi - mcmaster4664T303	
9	3	MAX00002	S101	corner plate - mcmaster4664T220	
17	1	MAX00002	A005	membrane	
18	2	MAX00002	A006	membrane	
22	1	MAX00002	A006	balancier	
24	1	MAX00002	P012	moteur - moteur	
25	1	MAX00002	A105	pouille	
26	1	MAX00002	A104	vilbrequin	
27	1	MAX00002	A106	COURROIE FREIN	




ITEM A000

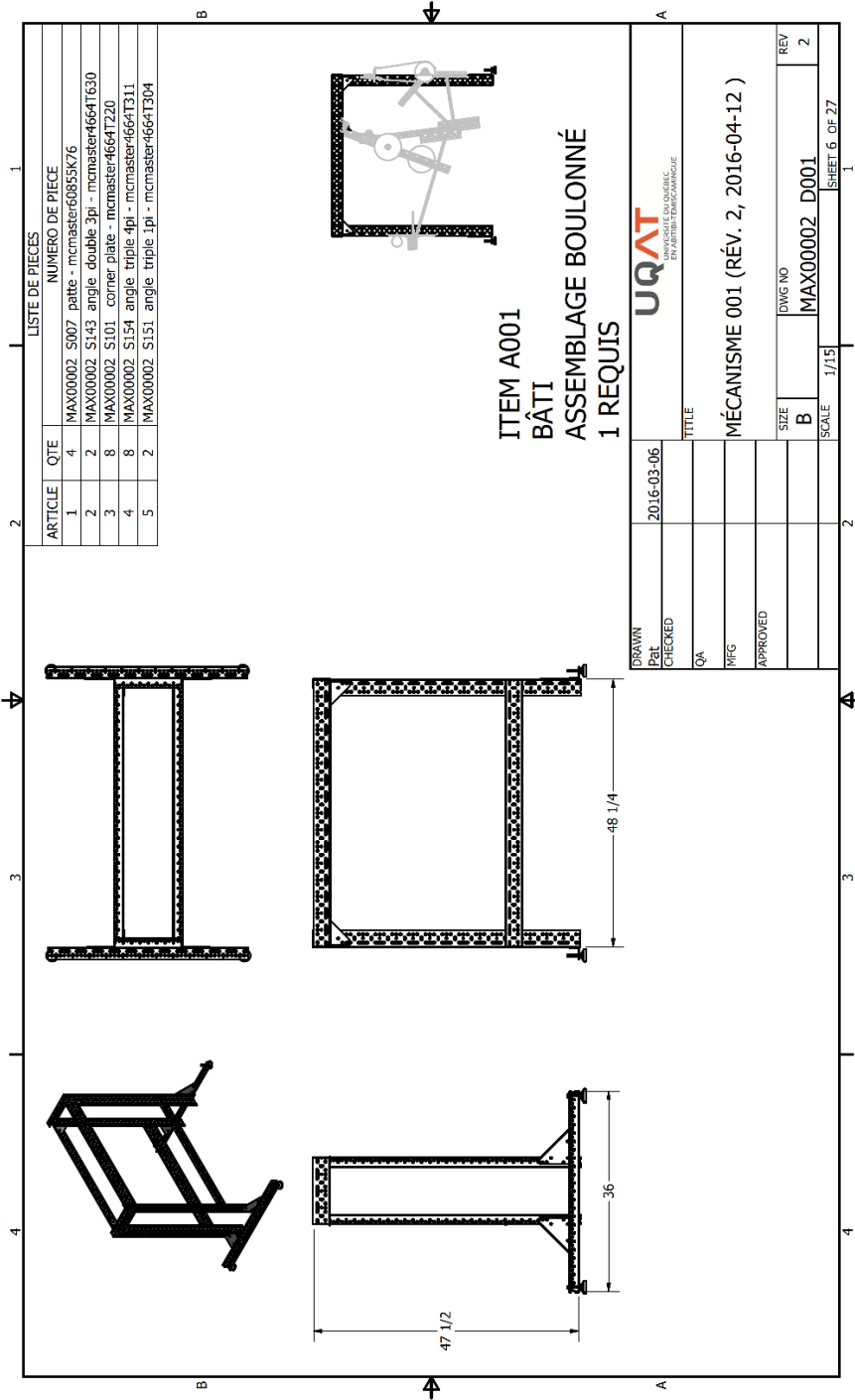
ASSEMBLAGE GÉNÉRAL

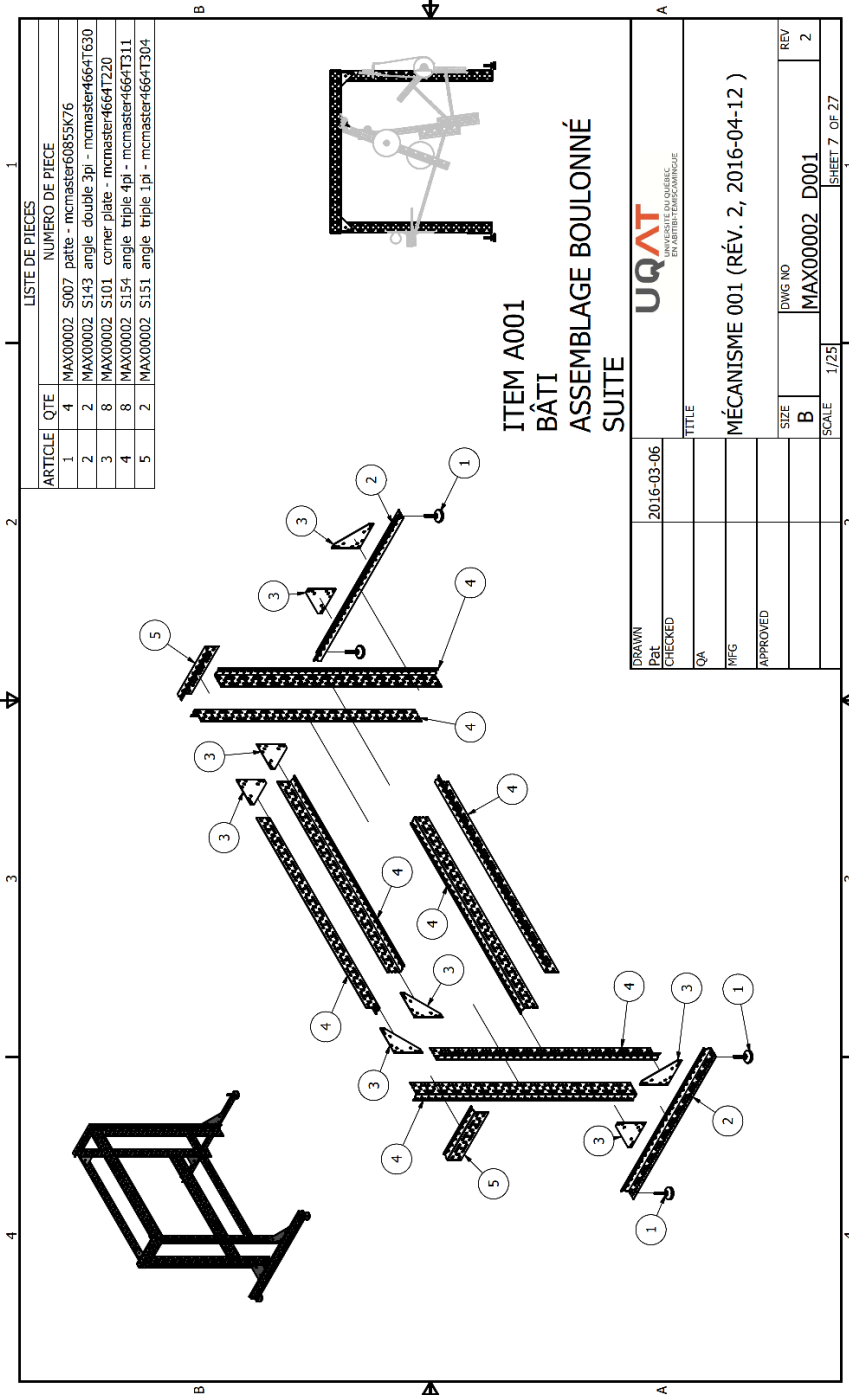
DRAWN	2016-03-06	TITLE	MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)
CHECKED			
QA			
MFG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		B	MAX00002
			D001
		SCALE	0,08 : 1
		REV	2
			SHEET 5 OF 27



VUE W-W
ECHELLE 1/4







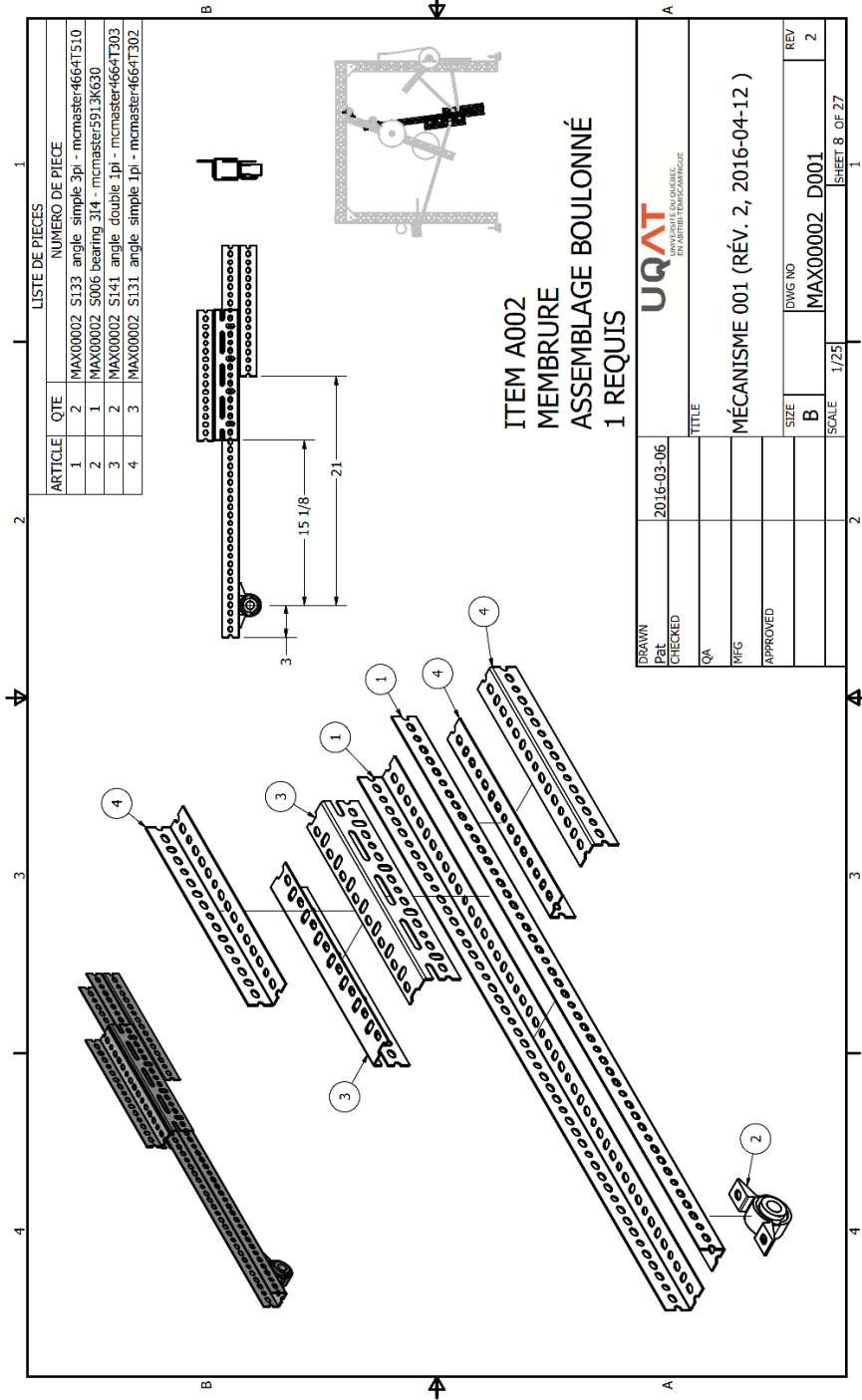
LISTE DE PIÈCES	
ARTICLE	QTE
1	4
2	2
3	8
4	8
5	2

NUMERO DE PIECE	
MAX00002	S007
MAX00002	S143
MAX00002	S101
MAX00002	S154
MAX00002	S151

ITEM A001
BÂTI
ASSEMBLAGE BOULONNÉ
SUIITE

DRAWN	2016-03-06
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	DWG NO
B	MAX00002
SCALE	1/25
REV	2
SHEET 7 OF 27	



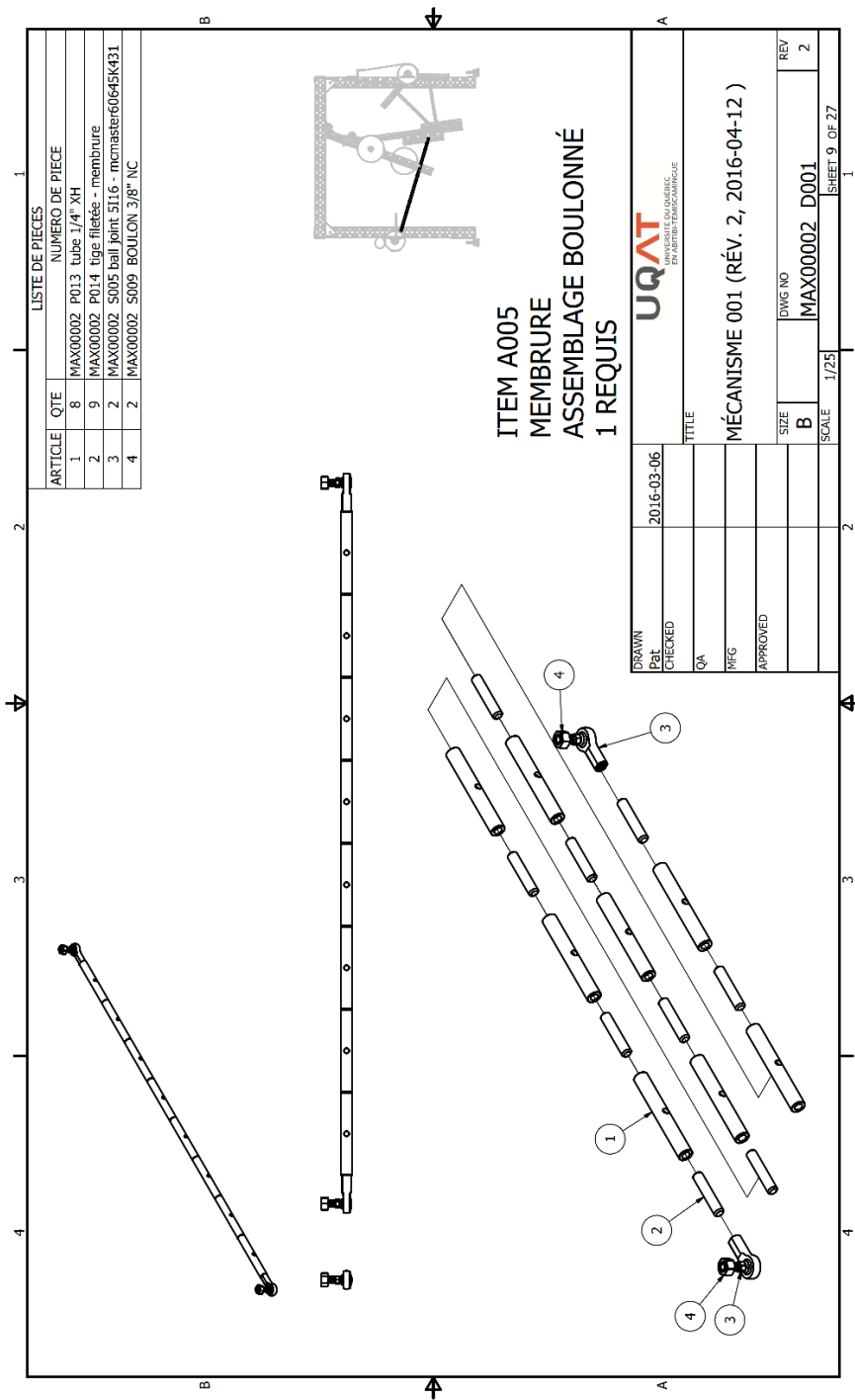


LISTE DE PIÈCES

ARTICLE	QTE	NUMERO DE PIECE
1	2	MAX00002 S133 angle simple 3pl - mcmaster4664T510
2	1	MAX00002 S006 bearing 3/4 - mcmaster5913K630
3	2	MAX00002 S141 angle double 1pl - mcmaster4664T303
4	3	MAX00002 S131 angle simple 1pl - mcmaster4664T302

ITEM A002
MEMBRURE
ASSEMBLAGE BOULONNÉ
1 REQUIS

DRAWN	2016-03-06
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	DWG NO
B	MAX00002
REV	D001
2	
SCALE	1/25
SHEET 8 OF 27	



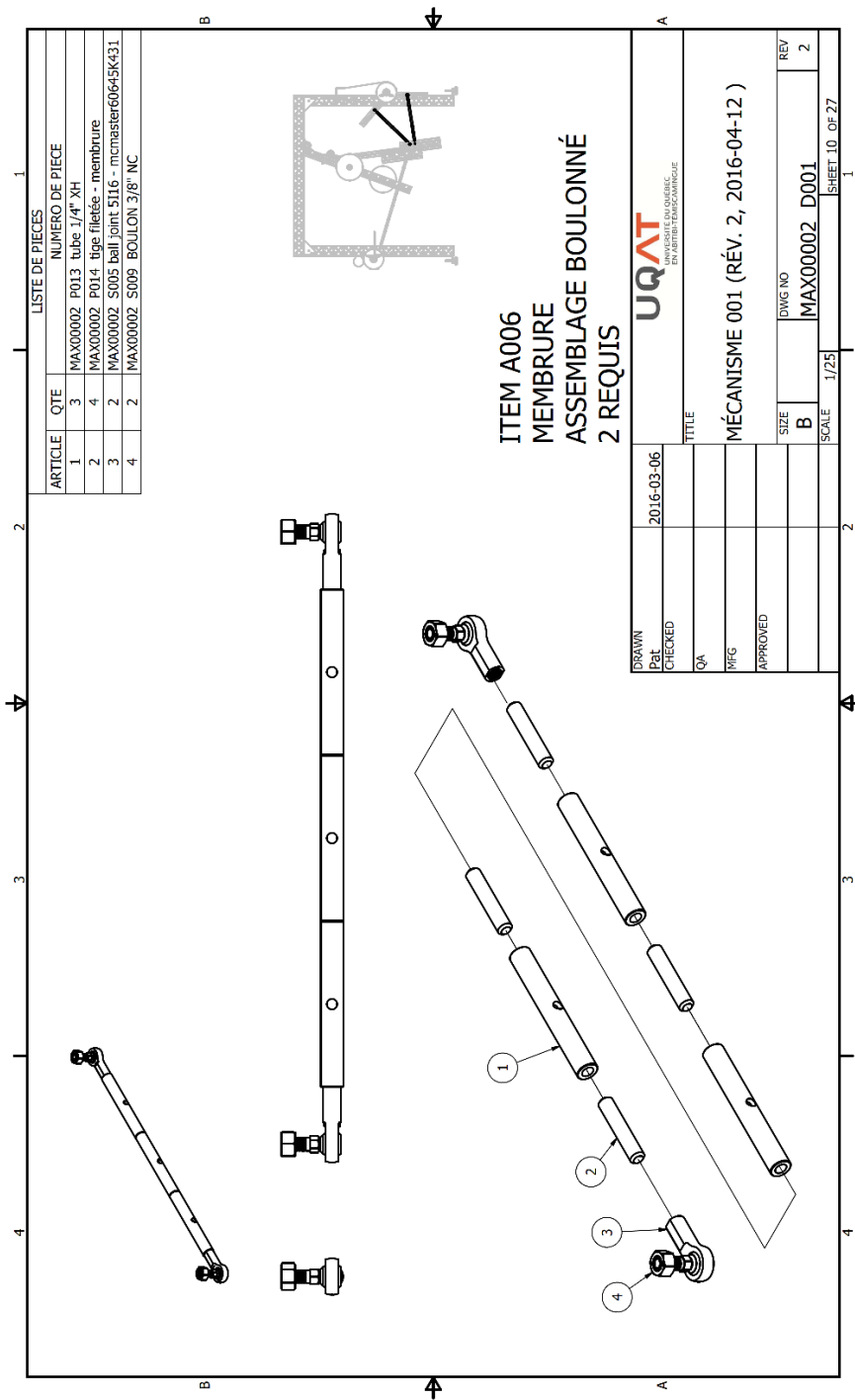
LISTE DE PIÈCES	
ARTICLE	QTE
1	8
2	9
3	2
4	2

NUMERO DE PIECE	
MAX00002	P013 Tube 1/4" XH
MAX00002	P014 tige filetée - membrane
MAX00002	S005 ball joint 5116 - mcmaster60645K431
MAX00002	S009 BOULON 3/8" NC

**ITEM A005
MEMBRURE
ASSEMBLAGE BOULONNÉ
1 REQUIS**

DRAWN	2016-03-06
Pat	
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	DWG NO
B	MAX00002
REV	D001
2	
SCALE	1/25
SHEET 9 OF 27	





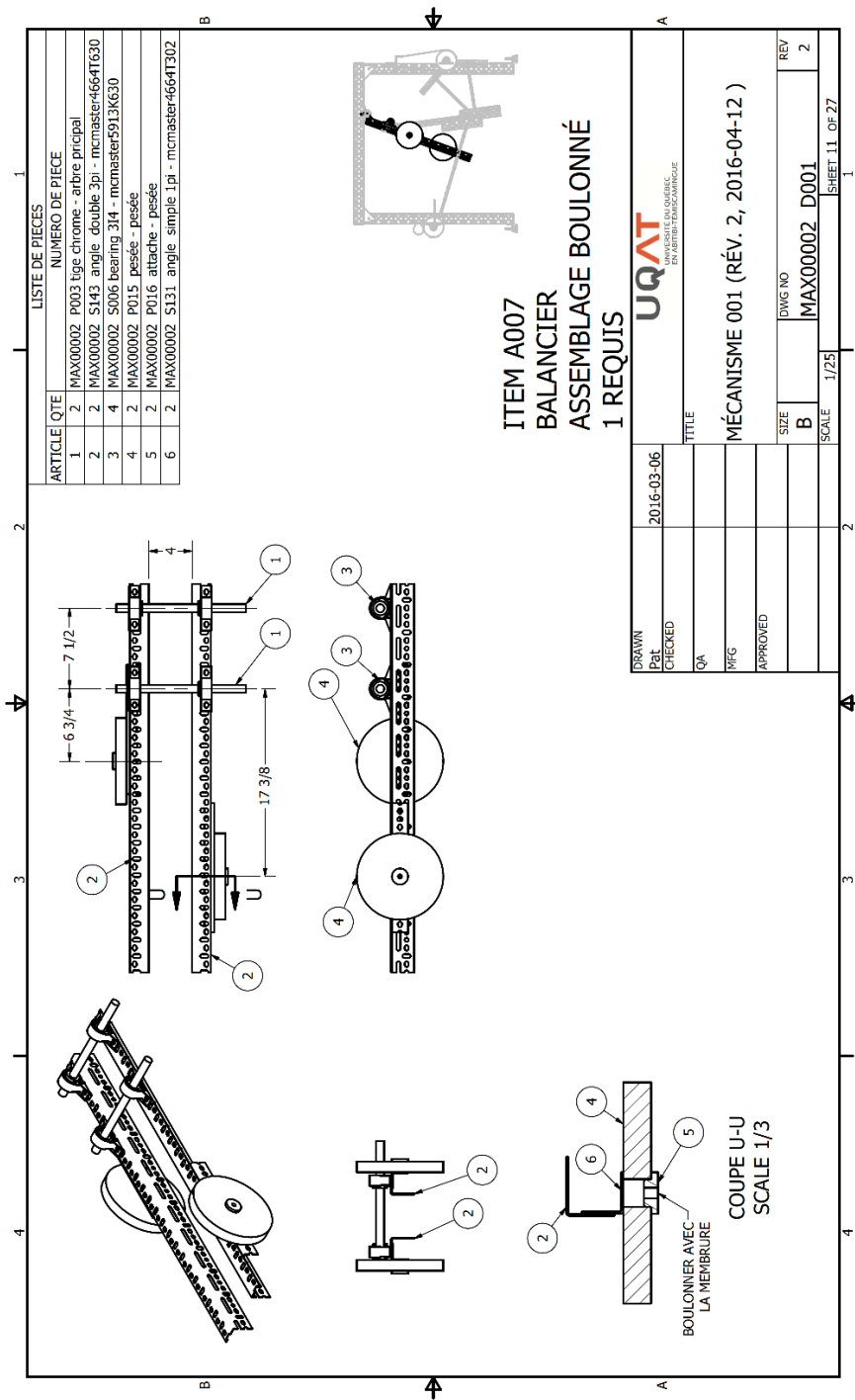
LISTE DE PIÈCES		
ARTICLE	QTE	NUMERO DE PIECE
1	3	MAX00002 P013 tube 1/4" XH
2	4	MAX00002 P014 tige filetée - membrane
3	2	MAX00002 S005 ball joint 5116 - micmaster60645K431
4	2	MAX00002 S009 BOULON 3/8" NC

**ITEM A006
MEMBRURE
ASSEMBLAGE BOULONNÉ
2 REQUIS**

DRAWN	2016-03-06	TITLE	
Pat			
CHECKED			
QA			
MFG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		B	MAX00002 D001
		SCALE	1/25
			SHEET 10 OF 27



MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)



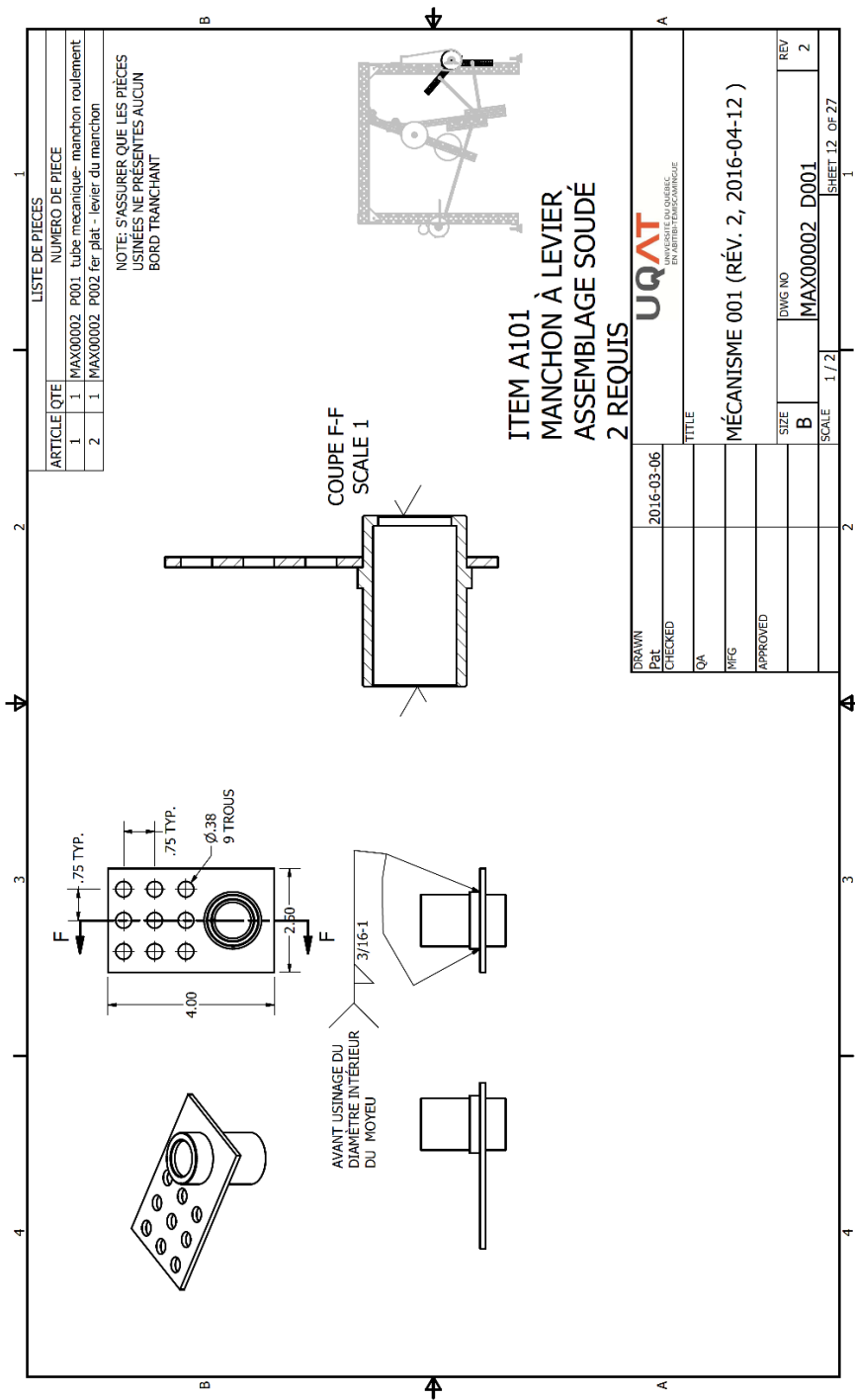
LISTE DE PIECES	
ARTICLE	QTE
1	2
2	2
3	4
4	2
5	2
6	2

NUMERO DE PIECE	
1	MAX00002 PD03 lqg chrome - arbre principal
2	MAX00002 S143 angle double 3/1 - mcmaster4664T630
3	MAX00002 S006 bearing 314 - mcmaster5913K630
4	MAX00002 P015 pesse - pesse
5	MAX00002 P016 attache - pesse
6	MAX00002 S131 angle simple 1/1 - mcmaster4664T302

ITEM A007
BALANCIER
ASSEMBLAGE BOULONNE
1 REQUIS

DRAWN	2016-03-06
Pat	
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	DWG NO
B	MAX00002
REV	D001
2	
SCALE	1/25
SHEET 11 OF 27	





LISTE DE PIÈCES	
ARTICLE	QTE
1	1
2	1

NUMERO DE PIÈCE	
1	MAX00002 P001 tube mecanique- manchon roulement
2	MAX00002 P002 fer plat - levier du manchon

NOTE: S'ASSURER QUE LES PIÈCES
USINÉES NE PRÉSENTENT AUCUN
BORD TRANCHANT

ITEM A101
MANCHON À LEVIER
ASSEMBLAGE SOUDÉ
2 REQUIS

DRAWN	2016-03-06
Pat	
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	DWG NO
B	MAX00002 D001
REV	REV
2	2
SCALE	1 / 2
SHEET 12 OF 27	

UQAT	UNIVERSITÉ QUÉBÉCOISE
INSTITUT DE MÉCANIQUE	

LISTE DE PIÈCES	
ARTICLE	QTE
2	2
MAX00002	A101 manchon levier
7	1
MAX00002	A103 disque frein
1	1
MAX00002	P003 tige chrome - arbre principal
6	1
MAX00002	P005 tm - manchon
3	2
MAX00002	S200 one way bearing 3/4x1 - mcmaster 2489K600
4	4
MAX00002	S210 needle bearing 3/4x1 - mcmaster 5905K270
5	3
MAX00002	S220 thrust bearing 3/4x1 1/4 - mcmaster 5909K330
9	6
MAX00002	SZ21 rondelle roulement - diode

NOTE: S'ASSURER QUE LES PIÈCES USINÉES NE PRÉSENTENT AUCUN BORD TRANCHANT

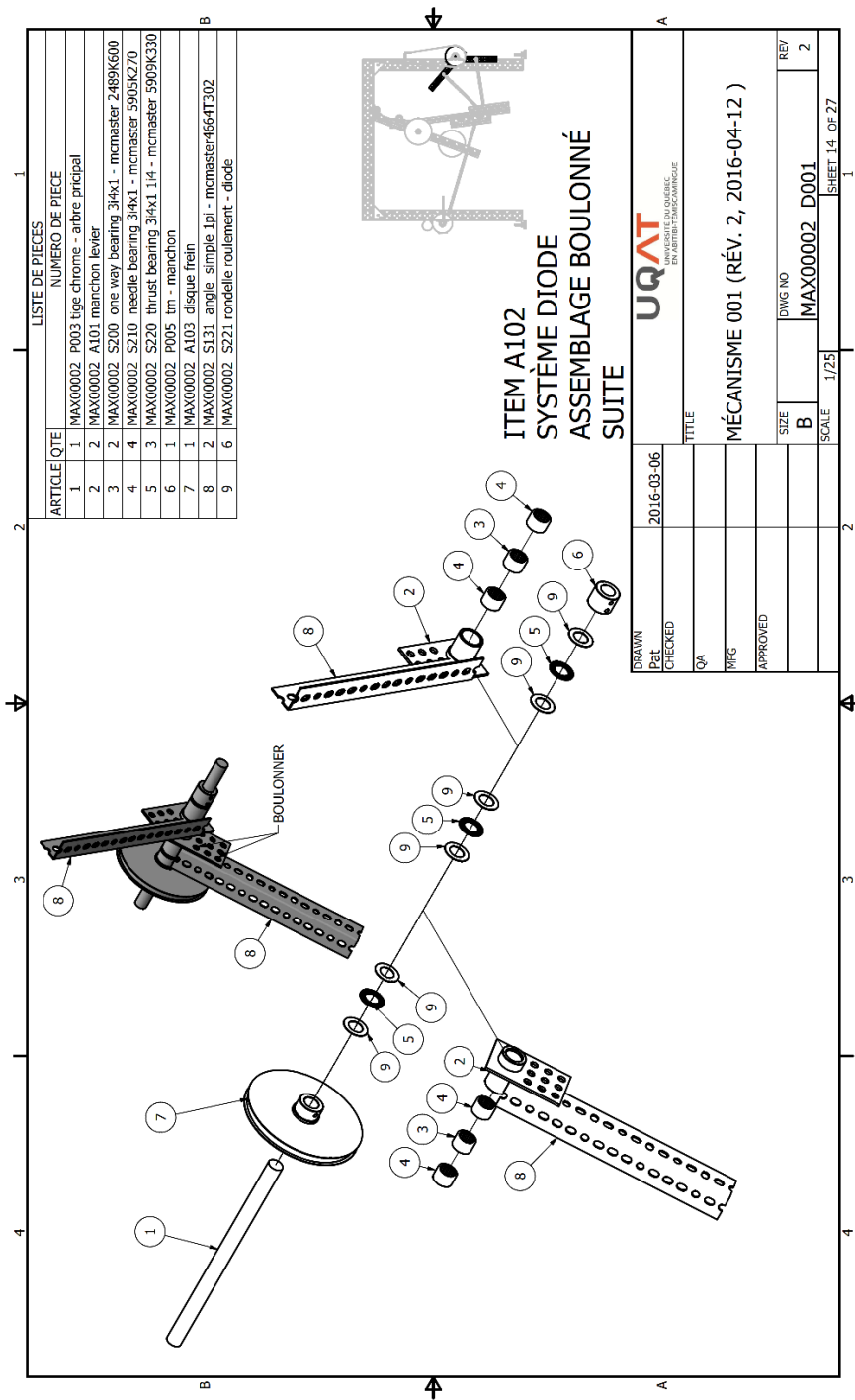
1 2 3 4 5 6 7

COUPE H-H
SCALE 1/2

DETAIL J
ECHELLE 2

ITEM A102
DIODE MÉCANIQUE
ASSEMBLAGE BOULONNÉ
1 REQUIS

DRAWN	2016-03-06	TITLE
CHECKED		MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)
QA		
MFG		
APPROVED		
SIZE	B	DWG NO
		MAX00002
REV		D001
		2
SCALE	1/3	SHEET 13 OF 27

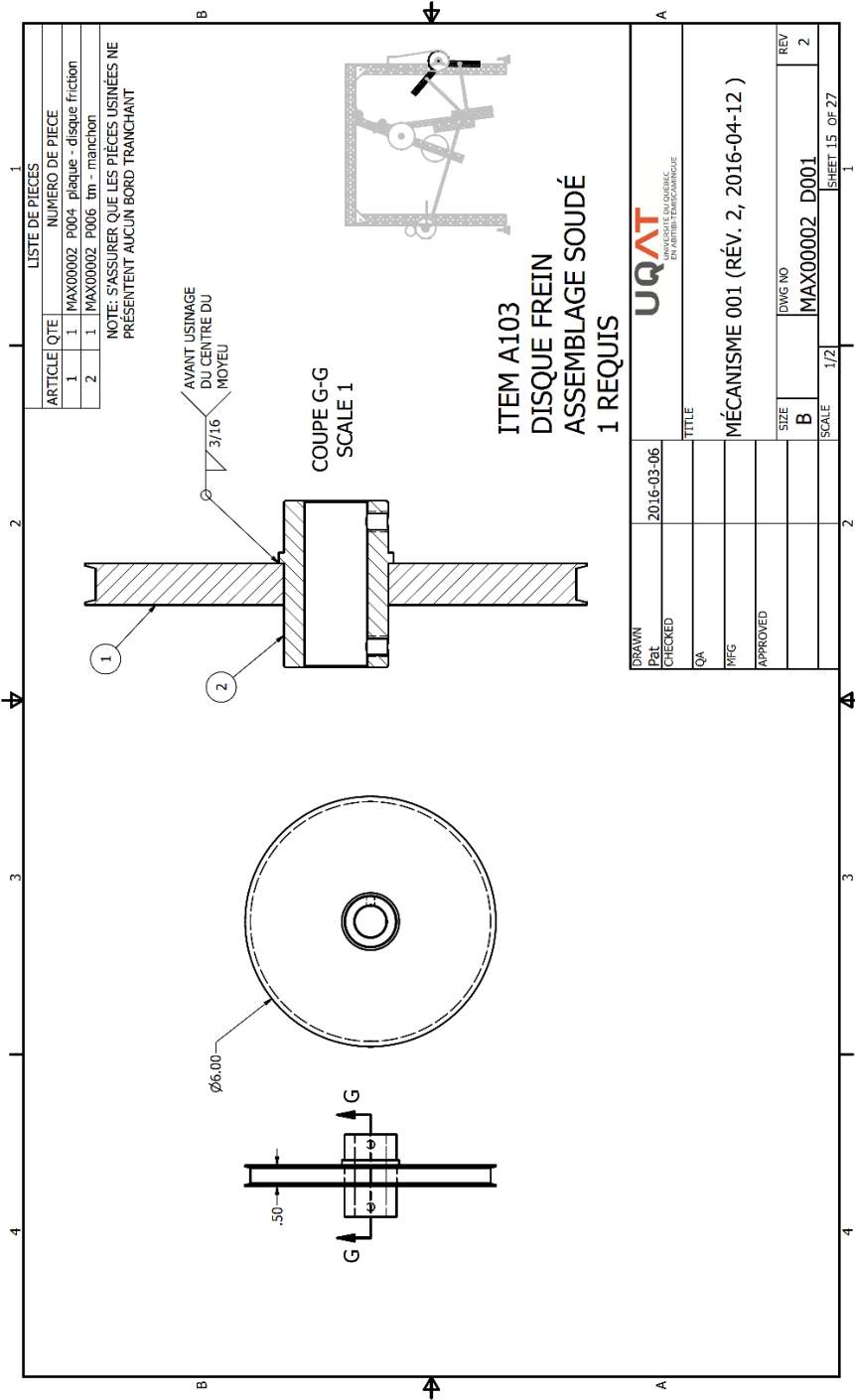


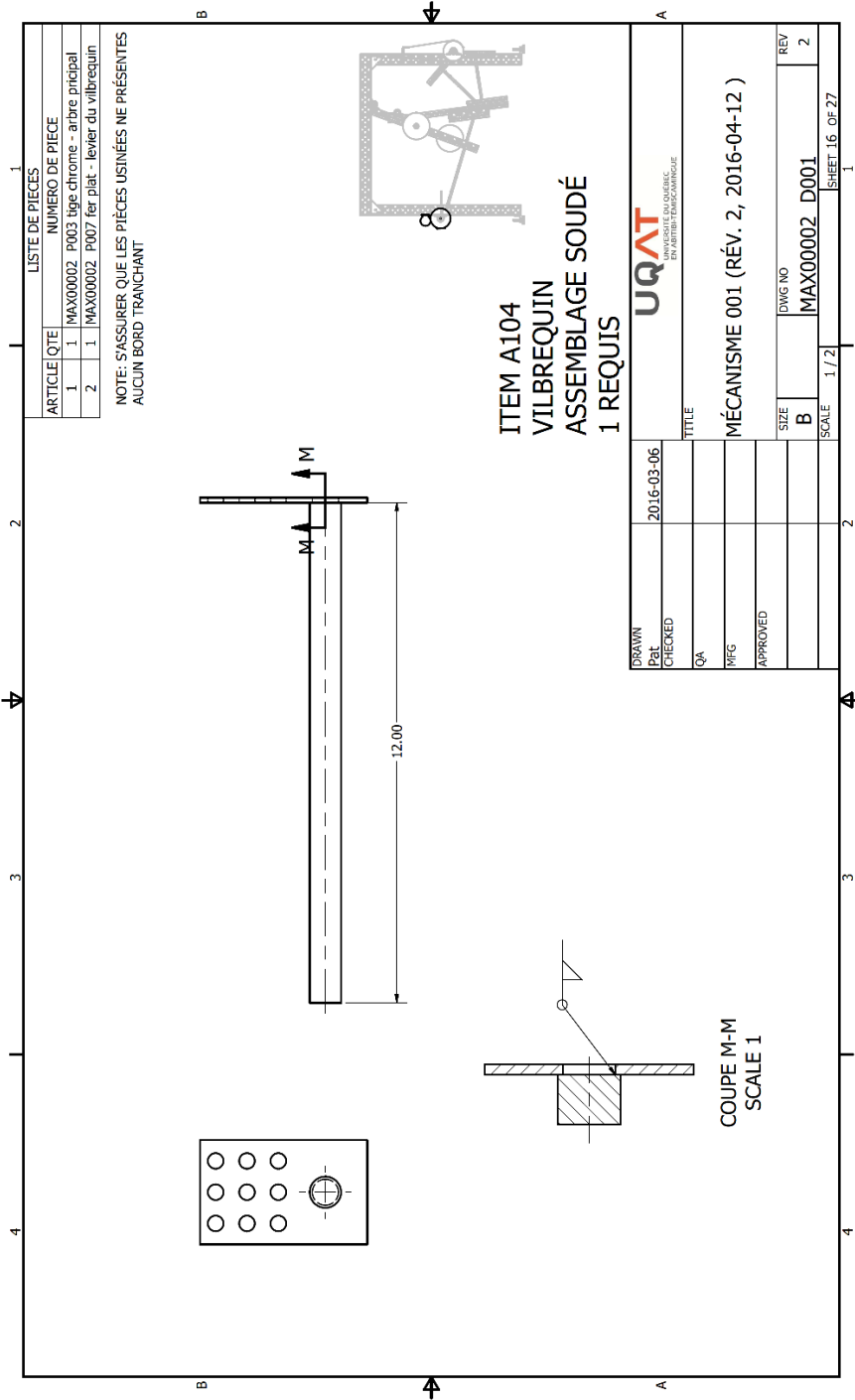
LISTE DE PIÈCES	
ARTICLE	NUMERO DE PIECE
1	MAX00002 P003 tige chrome - arbre principal
2	MAX00002 A101 manchon levier
3	MAX00002 S200 one way bearing 3/4x1 - mcmaster 2489K600
4	MAX00002 S210 needle bearing 3/4x1 - mcmaster 5905K270
5	MAX00002 S220 thrust bearing 3/4x1 1/4 - mcmaster 5909K330
6	MAX00002 P005 tm - manchon
7	MAX00002 A103 disque fretin
8	MAX00002 S131 angle simple 1pi - mcmaster-466FT302
9	MAX00002 S221 rondelle roulement - diode

ITEM A102
SYSTÈME DIODE
ASSEMBLAGE BOULONNÉ
SUITE

DRAWN	2016-03-06
CHKD	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	DWG NO
B	MAX00002 D001
SCALE	1/25
	SHEET 14 OF 27





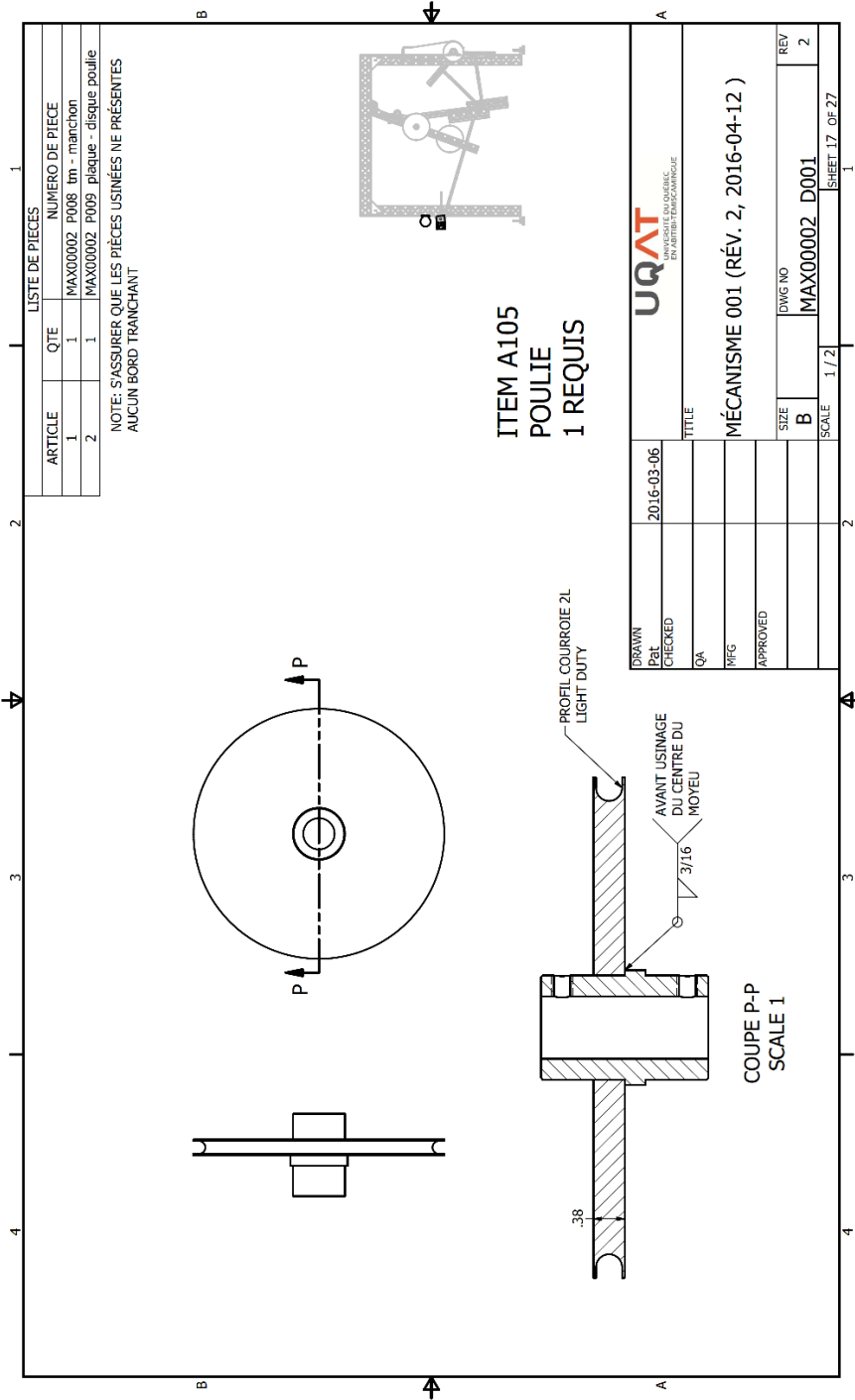


LISTE DE PIÈCES

ARTICLE	QTE	NUMERO DE PIECE
1	1	MAX00002 P003 tige chrome - arbre principal
2	1	MAX00002 P007 fer pit - levier du vilbrequin

NOTE: S'ASSURER QUE LES PIÈCES USINÉES NE PRÉSENTENT AUCUN BORD TRANCHANT

SIZE	B	DWG NO	MAX00002	D001
REV	2	SCALE	1 / 2	SHEET 16 OF 27



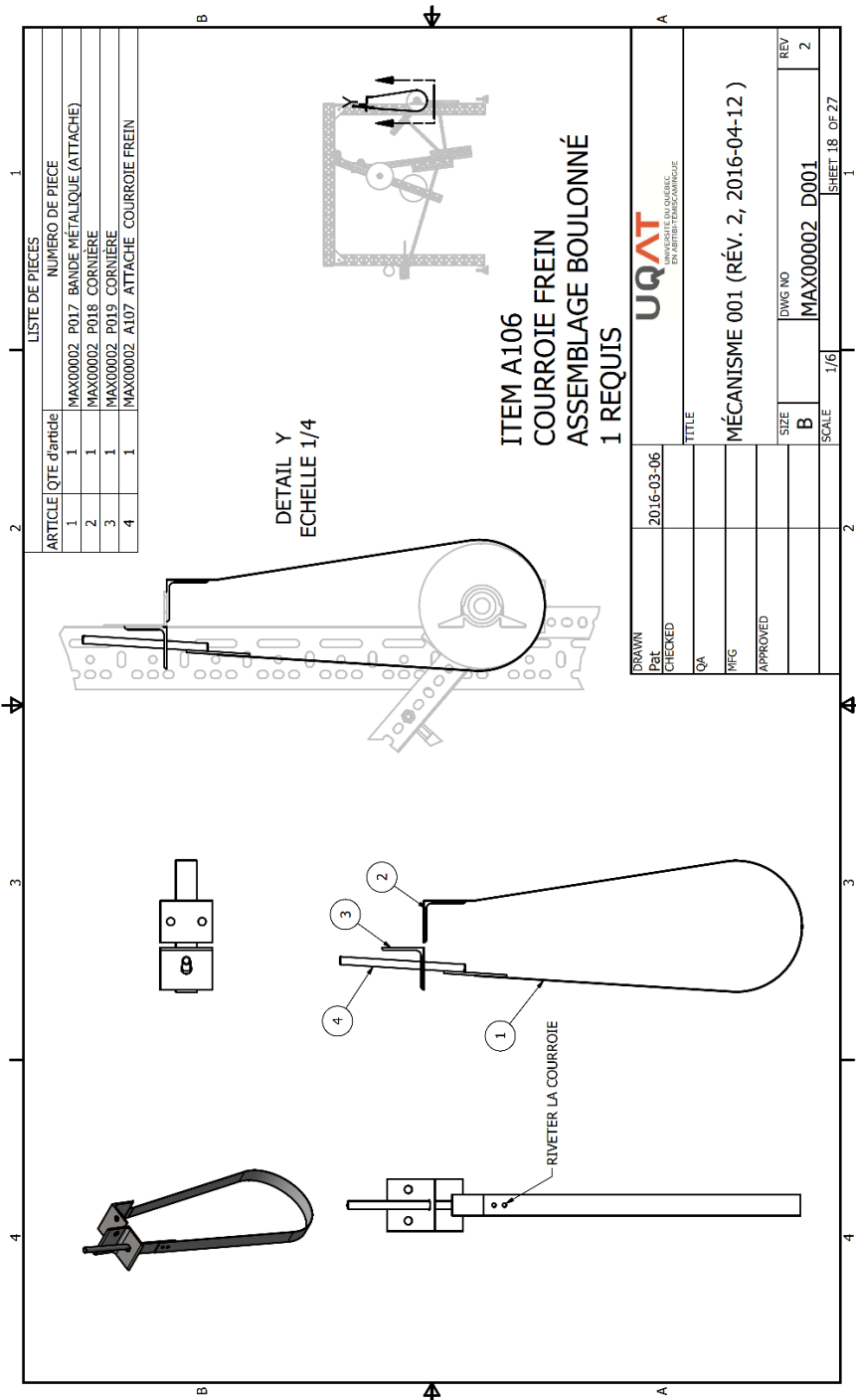
LISTE DE PIÈCES		NUMERO DE PIECE	
ARTICLE	QTE	MAX0002	P008 tm - manchon
1	1	MAX0002	P009 pisque - disque poulie

NOTE: S'ASSURER QUE LES PIÈCES USINÉES NE PRÉSENTENT AUCUN BORD TRANCHANT

**ITEM A105
POULIE
1 REQUIS**

DATE	2016-03-06	TITLE	MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)
DRAWN		UQAT	
CHECKED		BY	
QA		APPROVED	
MFG		SCALE	1 / 2
REV	2	DWG NO	MAX00002 D001
SIZE	B	SHEET 17 OF 27	

COUPE P-P
SCALE 1



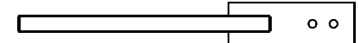
LISTE DE PIÈCES	
ARTICLE	QTE d'article
1	1
2	1
3	1
4	1

NUMERO DE PIECE	
MAX00002	P017 BANDE MÉTALLIQUE (ATTACHE)
MAX00002	P018 CORNIÈRE
MAX00002	P019 CORNIÈRE
MAX00002	A107 ATTACHE COURROIE FREIN

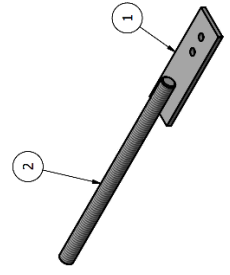
DRAWN	2016-03-06	TITLE	MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)
Pat		SIZE	B
CHECKED		DWG NO	MAX00002
QA		SCALE	1/6
MFG		REV	2
APPROVED		SHEET	18 OF 27

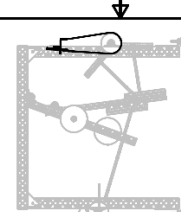
LISTE DE PIÈCES	
ARTICLE	QTE
1	1
2	1

NUMERO DE PIECE	
1	MAX00002 P020 FER PLAT
2	MAX00002 P021 TIGE FILETÉE 3/8" MC




3/16-1
3/16-1



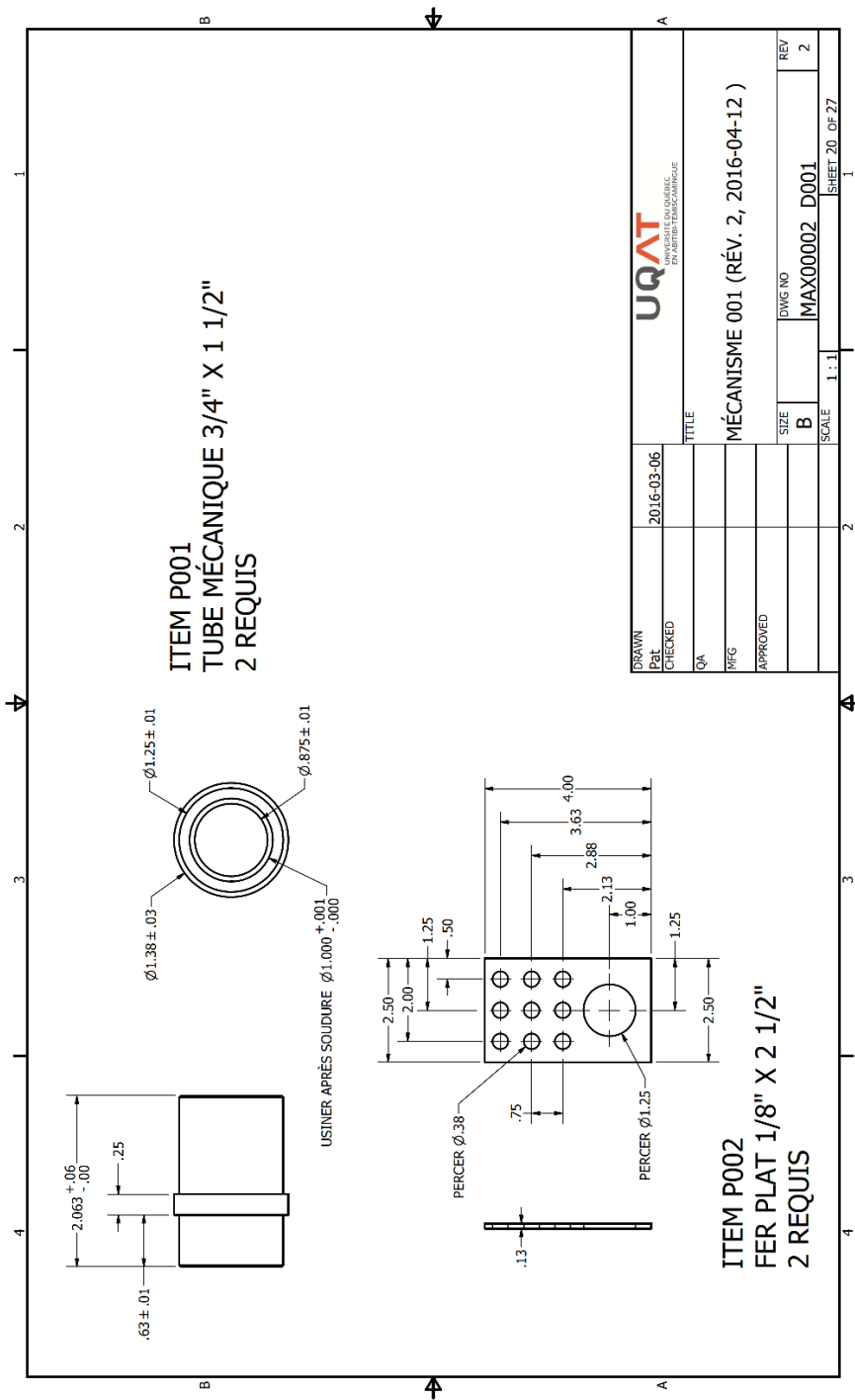


ITEM A106
SUPPORT COURROIE FREIN
ASSEMBLAGE SOUDÉ
1 REQUIS

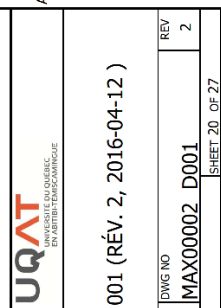


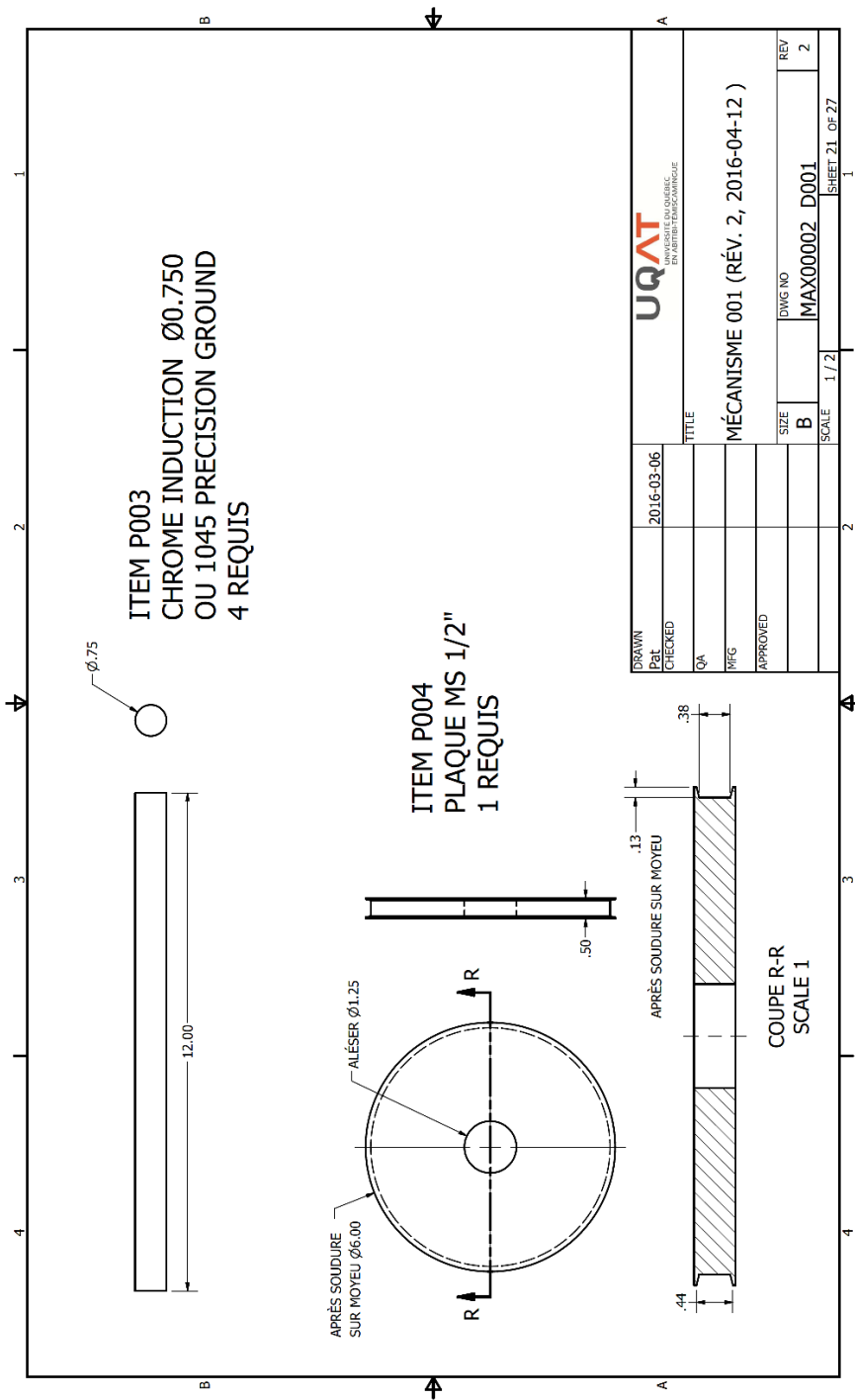
URAT
UNIVERSITY OF REGENTIA UNIVERSITY
BY APPOINTMENT

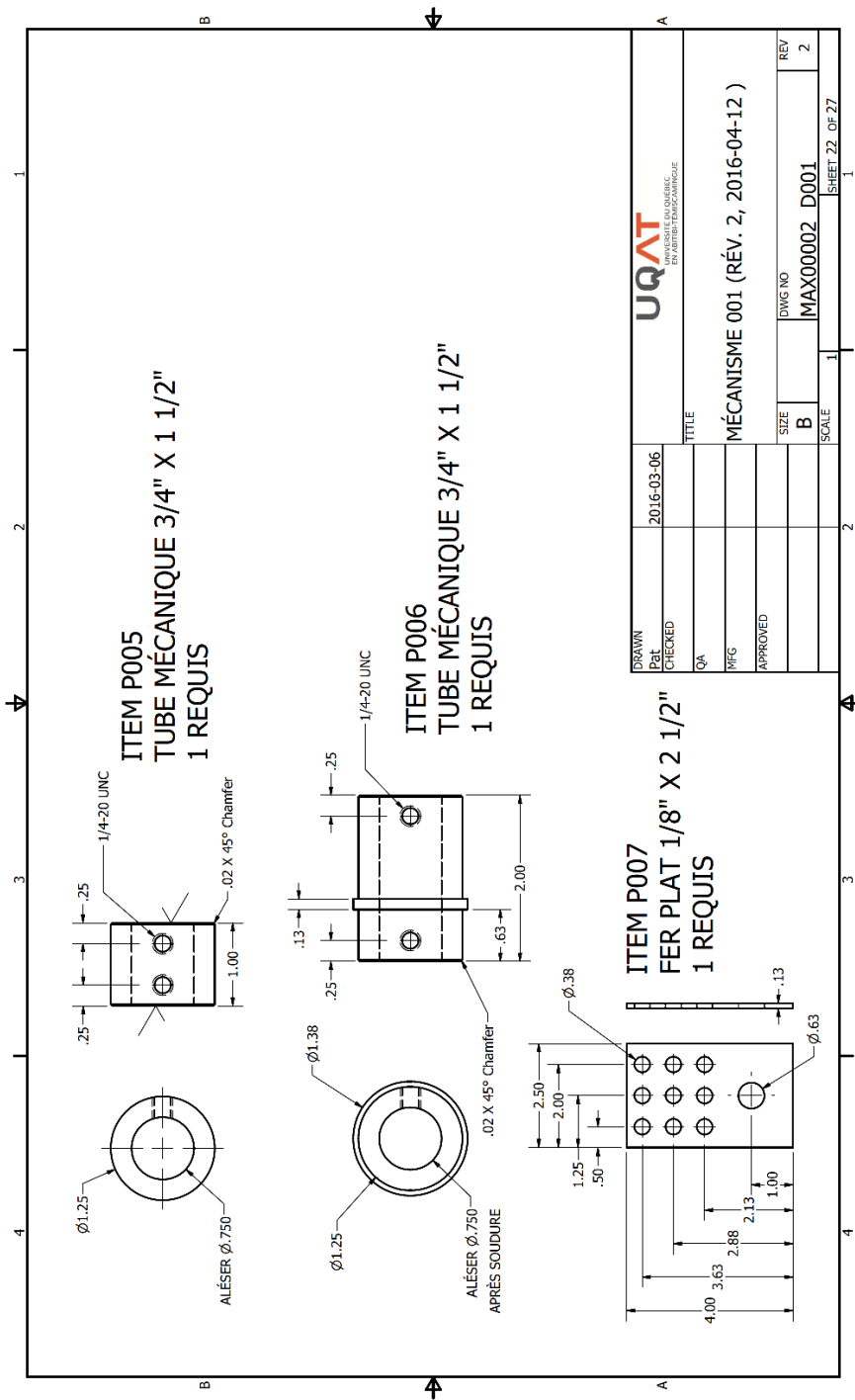
DRAWN	2016-03-06	TITLE	MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)
CHKD		SIZE	B
QA		DWG NO	MAX00002 D001
MFG		SCALE	1/2
APPROVED		REV	2



DATE	2016-03-06
DESIGNER	
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
SIZE	B
DWG NO	MAX00002
REV	2
SCALE	1 : 1
SHEET 20 OF 27	

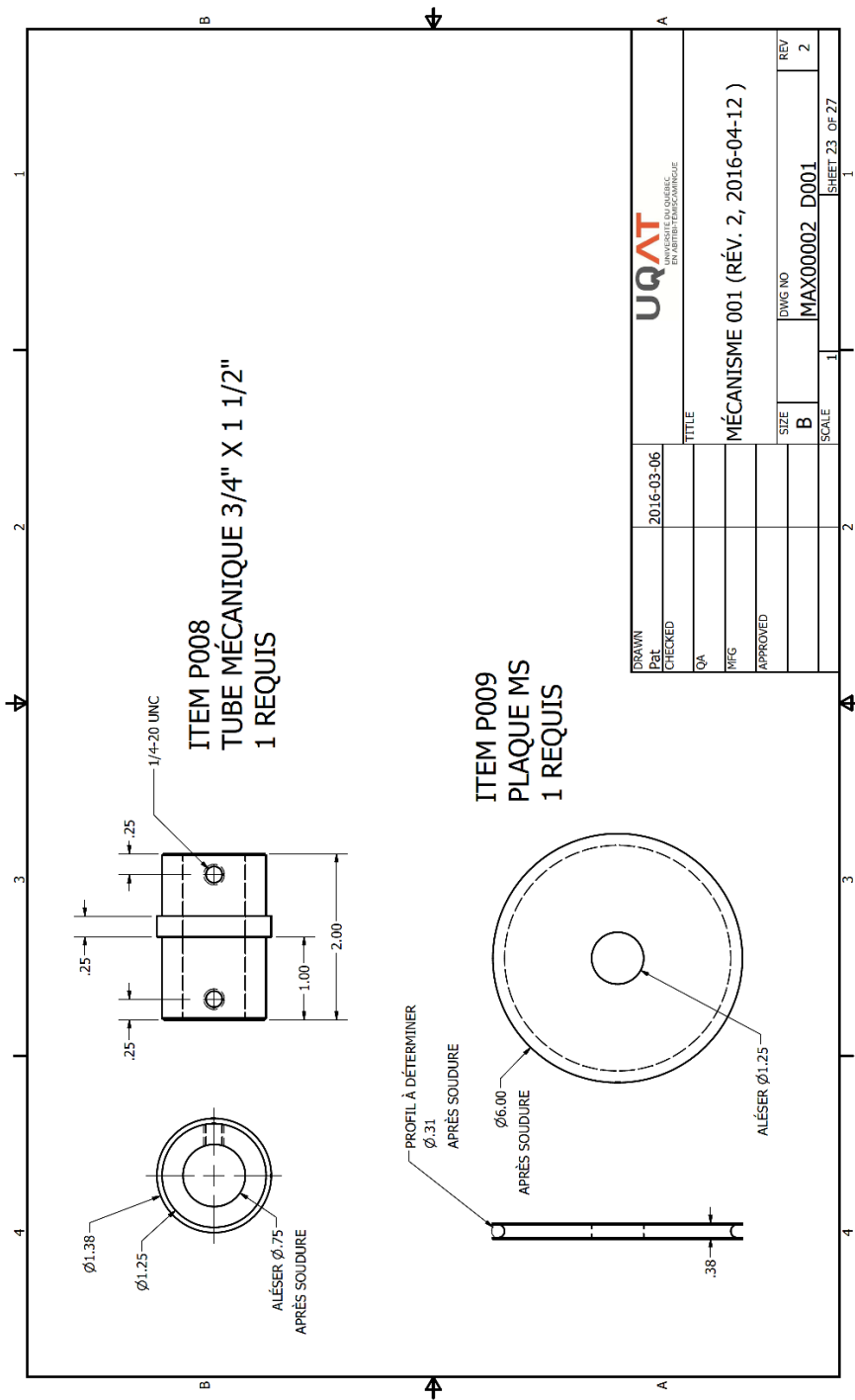


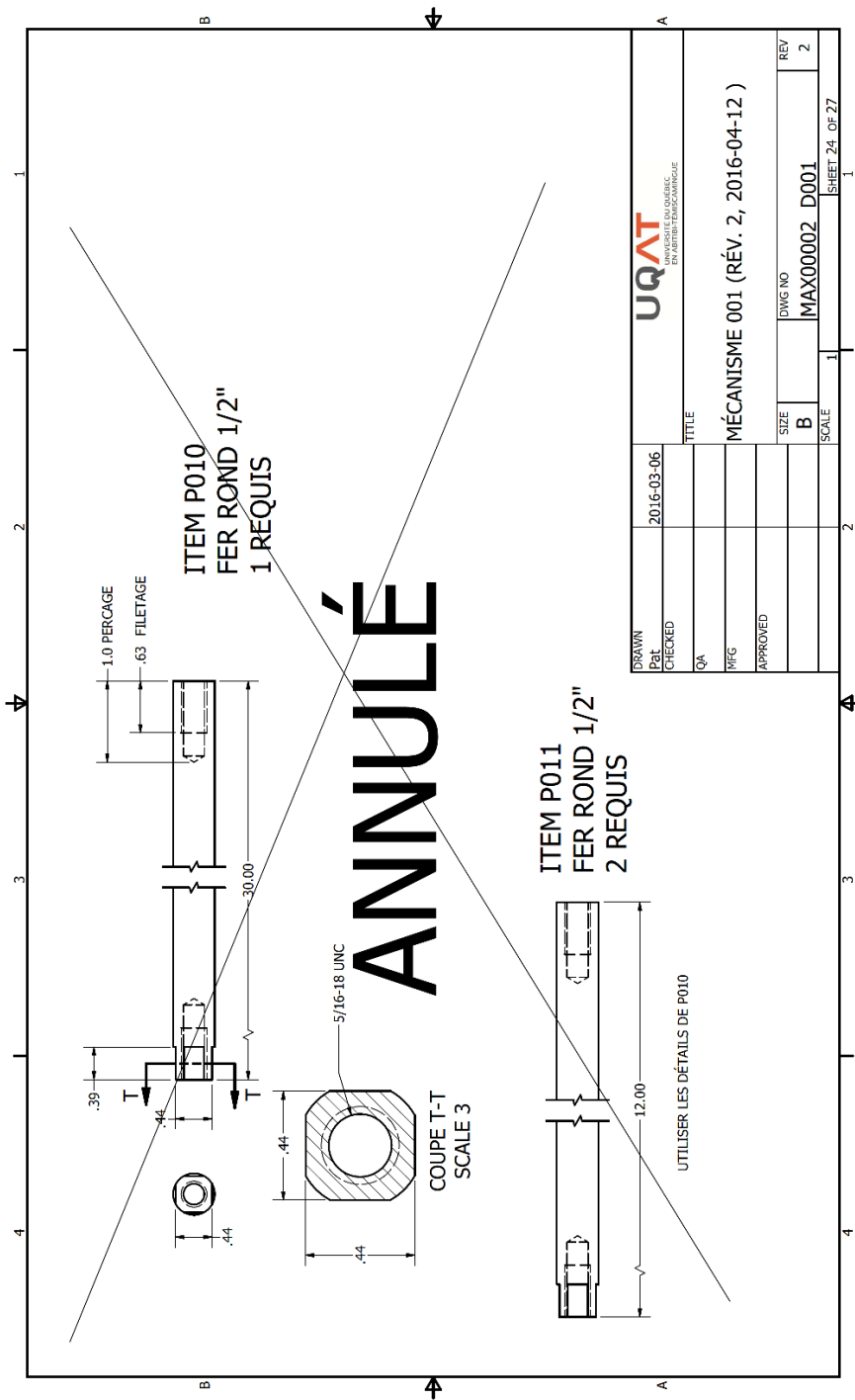




UQAT UNIVERSITÉ QUÉBÉCOISE EN ARCHITECTURE	2016-03-06	TITLE	MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)
DRAWN		QA	
CHECKED		MFG	
APPROVED		SIZE	B
		DWG NO	MAX00002
		SCALE	1
		REV	2

SHEET 22 OF 27



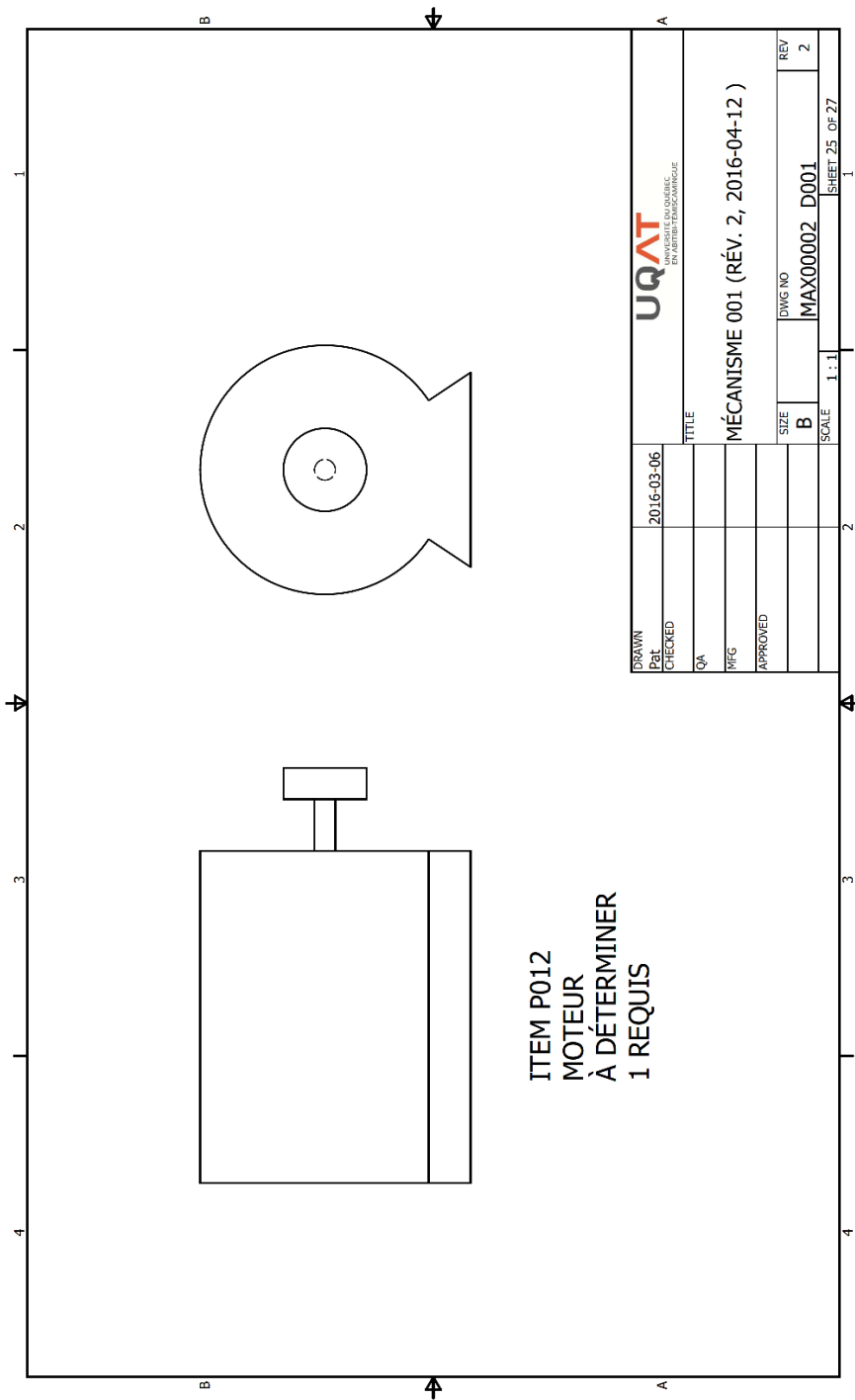


DRAWN	2016-03-06	TITLE	
CHKD			
QA			
MFG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		B	MAX00002
		SCALE	D001
			REV
			2

UQAT
UNIVERSITÉ QUÉBÉCOISE
EN ARTS, SCIENCES ET ARCHITECTURE

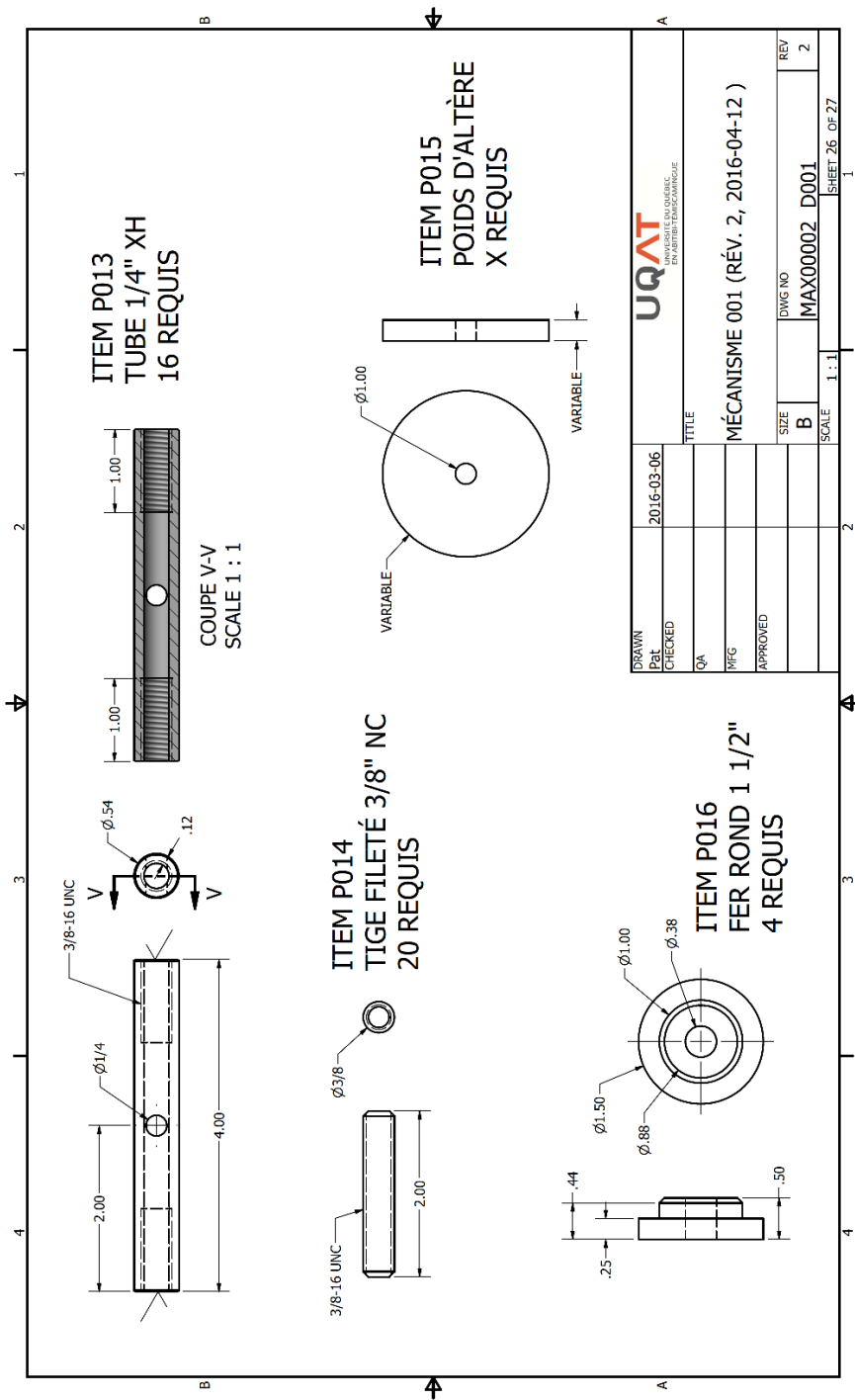
MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)

SHEET 24 OF 27



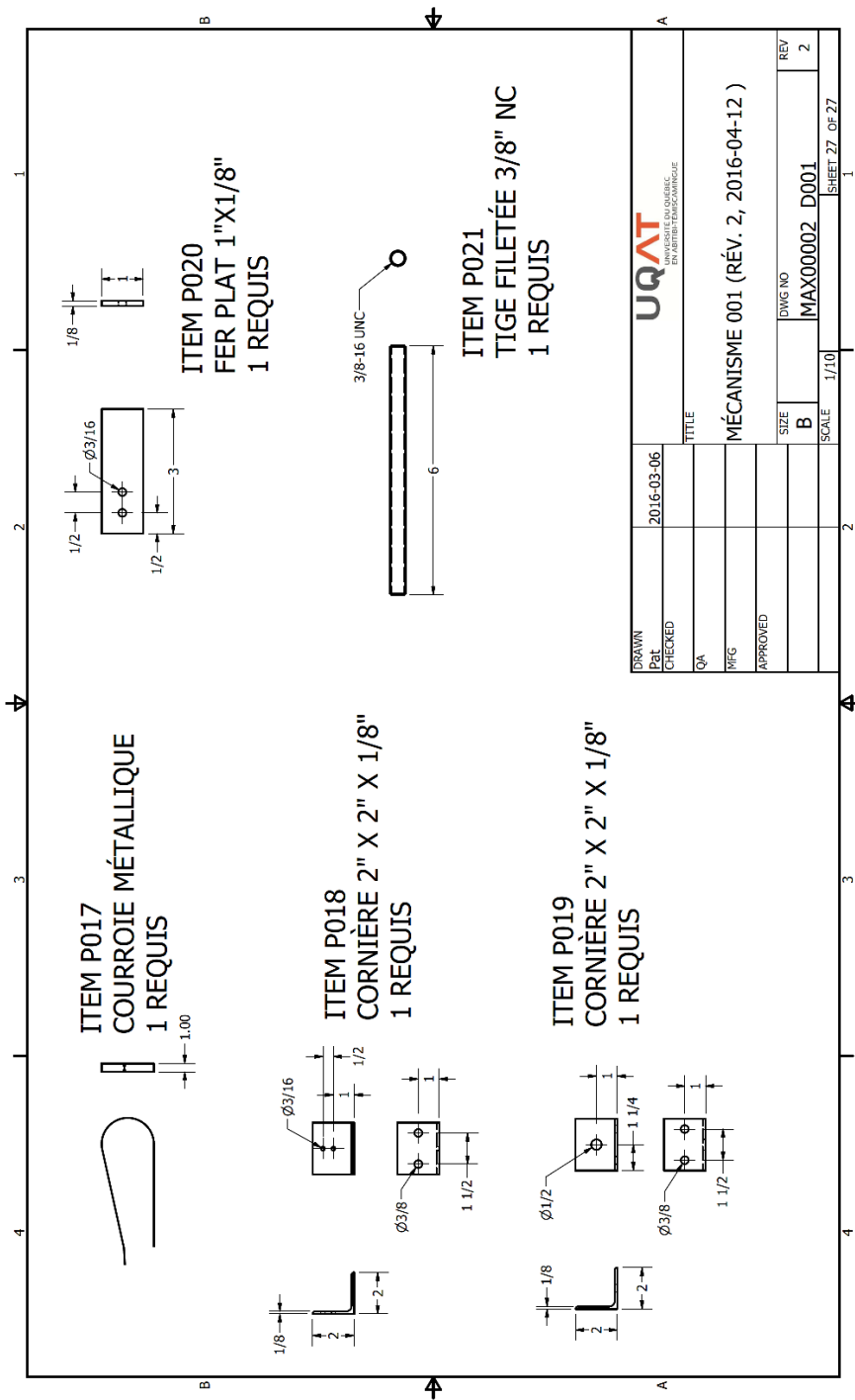
ITEM P012
 MOTEUR
 À DÉTERMINER
 1 REQUIS

DRAWN	2016-03-06	UQAT UNIVERSITÉ QUÉBÉCOISE EN ARCHITECTURE	
Pat		TITLE	
CHECKED		MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		B	MAX00002
APPROVED		SCALE	1 : 1
		REV	2
		SHEET 25 OF 27	



DATE	2016-03-06
PROJETS	
DESIGNER	
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)
SIZE	B
DWG NO	MAX00002
REV	2
SCALE	1 : 1

UQAT
UNIVERSITÉ QUÉBÉCOISE
EN ARTS, EN INGENIERIE



DRAWN	2016-03-06	TITLE	
CHKD			
CHECKED			
QA			
MFG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		B	MAX00002
		SCALE	1/10
			SHEET 27 OF 27

UQAT
 UNIVERSITÉ QUÉBÉCOISE
 EN ARTS, SCIENCES ET
 TECHNOLOGIE

MÉCANISME 001 (RÉV. 2, 2016-04-12)

ANNEXE B : RAPPORT POUR ABITIBI-GÉOPHYSIQUE

L'annexe B est le rapport des travaux effectués pour Abitibi Géophysique à la suite de l'abandon de l'utilisation d'un CCC hydraulique. Les travaux portent sur l'étude et l'essai de différents principes de motorisation électrique et de système d'accrochage dans les trous de forage. Plusieurs prototypes exploratoires ont été réalisés.



ÉCOLE DE GÉNIE

Projet Mitacs:

Module de déplacement des sondes

Présenté par :

Patrick Bourgault

Présenté à :

Abitibi-Géophysique Inc.

26 mars2020

Table des matières

1	Introduction.....	1
2	Le projet.....	2
2.1	L'entreprise.....	2
2.2	Les intevenants.....	2
2.3	Présentation du projet.....	2
2.4	Méthodologie.....	3
2.4.1	Effectué.....	3
2.4.2	En cours.....	3
2.4.3	A faire.....	3
2.5	Contraintes.....	4
3	Revue des principes de déplacement des robots d'inspection de conduites.....	5
3.1	Choix du principe de locomotion.....	5
4	Mécanisme d'accrochage.....	6
5	Les moteurs exploratoires.....	7
5.1	1 ^{er} moteur exploratoire : Moteur rotatif à arbre creux.....	7
5.2	2 ^e moteur exploratoire : TLIM V1.....	7
5.3	3 ^e moteur exploratoire : TLIM V2.....	8
5.3.1	Le cœur magnétique tranché du primaire.....	8
5.4	4 ^e moteur exploratoire : Chaîne magnétique #1 (CM1).....	8
5.5	5 ^e moteur exploratoire : VOICE COIL #1 (VC1).....	8
5.6	6 ^e moteur exploratoire : VOICE COIL #2 (VC2).....	9
5.7	7 ^e moteur exploratoire : VOICE COIL #3 (VC3).....	10
5.8	8 ^e moteur exploratoire : VOICE COIL #4.....	11
5.8.1	VOICE COIL V5 (VC5).....	12
5.8.2	VOICE COIL 6 (VC6).....	12
5.9	9 ^e Moteur exploratoire : TLIM V3.....	14
5.10	Conclusion pour les moteurs exploratoires.....	15
6	Calculs de conception et d'optimisation du moteur TLIM V3.....	16
6.1	Introduction.....	16
6.2	Le modèle mécanique.....	16
6.2.1	Quelles sont les dimensions pour une traction maximale?.....	17
6.3	L'acier du primaire.....	Erreur ! Signet non défini.
6.3.1	Le cœur magnétique laminée du primaire.....	Erreur ! Signet non défini.
6.4	Effet de l'inductance des composantes sur la force maximale.....	17

6.4.1	Observations sur les flux magnétique	19
6.5	Identification des constantes et variables	20
6.6	Les valeurs constantes :	20
6.7	Les variables :	20
Annexe A : Les prototypes exploratoires (P1MKx).....		21
6.7.1	Questions à répondre	21
6.7.2	Pourquoi construire un prototype	21
6.7.3	Quelle sont les critères de développement du prototype?	21
6.7.4	Quelles sont les caractéristiques particulières du prototype à cames?	21
6.7.5	Est-ce que le modèle à came est utilisable dans les conditions de sondage?	22
6.7.6	Prototype#1 version1(P1mk1).....	22
6.7.7	Prototype#1 version 2 (P1mk2).....	23
6.7.8	Dimensions générales de P1mk2.....	23
6.7.9	Arbre principal et came d'avancement.....	23
6.7.10	Came et levier d'accrochage	23
6.7.11	Conclusions	24
7	Annexe B : Effet de la position des pôles sur la force maximale.....	25
7.1.1	Tracé de la composante en Z de la force	25
7.1.2	Observations.....	25

1 Introduction

Abitibi-Géophysique Inc. est une compagnie de prospection géophysique. Il y a certaines situations où les sondes de prospection ne peuvent pas être déplacés par gravité. Dans le but d'avoir une solution pour ce type de problème, la compagnie a demandé à l'UQAT d'étudier la faisabilité d'un module pour le déplacement de sondes de prospection dans les trous de forage à faible pente.

Après l'étude de la problématique, de recherche documentaire et de recherche de fournisseur, il a été établi qu'un module de déplacement était faisable à condition de trouver une motorisation adaptée. N'ayant trouvé aucun produit adapté parmi ceux commercialement disponibles, il a été entrepris de déterminer les paramètres pour la motorisation.

Un des caractères particuliers pour la motorisation est la présence d'un tube qui doit traverser le module, incluant le moteur, pour permettre le passage de câbles de natures diverse. Le type de moteur suggéré sont les moteurs électrique linéaire tubulaire. En plus de permettre une conception avec un arbre creux, ce type de moteur peut être facilement allongé. Dans un forage la seule dimension qui ne soit pas contrainte est la longueur. Cela permet d'ajuster la longueur du moteur pour répondre aux demandes de l'application.

La construction de prototype de conception sommaire ont permis de réaliser des essais pratiques. Ces essais ont permis de valider la faisabilité du module avec ce type de moteur. Les prototypes de module ont été construit sur le principe du vers arpenteur « inchworm ». Les avantages de ce principe sont une grande surface d'adhérence, la simplicité mécanique et la possibilité d'une grande résilience. Le principe du vers arpenteur requière deux fixations cycliques momentanées en alternance. Un système à membrures actionné par un moteur linéaire a été conçu pour remplir cette fonction.

Le module de déplacement suggéré est constitué de trois moteurs linéaires et de deux systèmes d'accrochage et d'un système de contrôle. Le moteur principal étant beaucoup plus puissant, donc plus long, que les moteurs d'accrochage. La longueur totale estimé du module se situe entre 2 et 3 mètres.

Cinq moteurs prototypes de type « voice coil » ont été construit et deux de type induction ont été construit, certain partiellement, afin de cerner les difficultés de fabrication. Les performances de ces moteurs de conception sommaire ont été suffisantes pour continuer vers l'optimisation de ceux-ci.

L'optimisation des moteurs s'est avérée beaucoup plus complexe que prévue. Ce travail d'optimisation est encore en cours au moment d'écrire ces mots. Il est suggéré de trouver un spécialiste pour me remplacer afin d'accélérer le développement du module. Ou attendre que j'ai acquis ce qu'il faut pour résoudre.

2 Le projet

2.1 L'entreprise

Abitibi Géophysique

2.2 Les intervenants

Abitibi Géophysique :

Pierre Bérubé (Président)

Jonathan (Directeur)

UQAT :

Marin Éné (Directeur de maîtrise)

Li Zheng Chen (Co-Directrice de maîtrise)

Patrick Bourgault (Étudiant à la maîtrise en génie)

2.3 Présentation du projet

Le projet consiste à concevoir un système pour déplacer les sondes de prospection dans les trous de forage.

Initialement, l'objectif était d'utiliser un système entièrement mécanique. Le module conçu avec un convertisseur de type Constantinescu ainsi que la transmission de l'énergie par vibration via un fluide. Cette avenue a été écarté après une évaluation des contraintes logistiques reliée au sondage. Pour respecter ces contraintes logistiques, il est préférable d'utiliser un système électrique puisque l'équipement actuel utilise déjà cette forme d'énergie. Le module de déplacement a donc été développé pour utiliser l'électricité comme source d'énergie.

Après une évaluation des différentes options, il a été conclu que le principal obstacle à la réalisation du module est la conception d'actuateurs électriques adaptés à cette la situation. Parmi les options étudiées il a été établi que l'utilisation d'un moteur électrique linéaire était la meilleure option dû à la simplicité mécanique qui en découle.

2.4 Méthodologie

2.4.1 Effectué

La première étape a été de faire une revue bibliographique des travaux antérieurs. Ensuite, de concert avec Abitibi-Géophysique, bien définir les critères, les paramètres, les obstacles et les conditions qui sont spécifiques à ce type de projet.

Utiliser des outils de calculs (Matlab, Scilab...), modélisation (Solidwork, Inventor, Autocad...) et analyse (Ansys...) pour analyser et modifier le mécanisme.

Évaluation théorique de la performance et de la fonctionnalité préliminaire du dispositif.

Concevoir et fabriquer des prototypes à l'aide des outils disponibles à l'UQAT (machines-outils et autres...).

2.4.2 En cours

Faire l'optimisation des moteurs linéaires.

2.4.3 A faire

Réaliser en laboratoire des tests pour simuler des situations dans des trous de forage d'exploration minière avec les prototypes pour valider les simulations numériques.

Effectuer des tests préliminaires du dispositif avec les sondes sur le terrain pour vérifier que les données des sondes ne sont pas faussées par la présence du module.

UQAT Module de déplacement des sondes

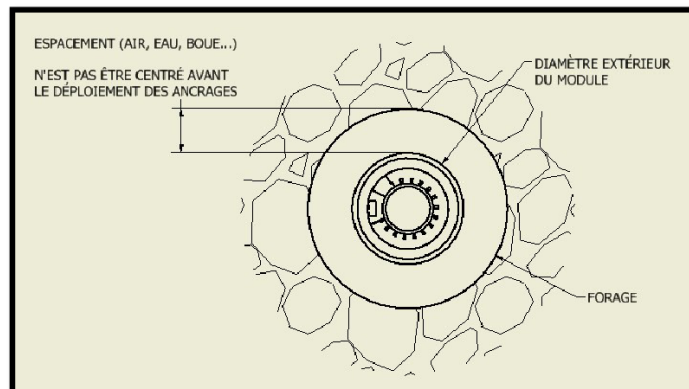
2.5 Contraintes du module

- Le module doit circuler dans le plus petit diamètre de toute les conditions rencontrées.
- Le diamètre intérieur de la fraise de carottage est le plus petit que le diamètre du forage.
- Le module doit pouvoir passer par le diamètre intérieur de la fraise de carottage (Core diameter).
- Le tableau suivant tiré du « Hard Rock miner's handbook » (Jack de la Vergne, Stantec consulting), donne les dimensions des principaux standards de carottage.

Bit Size	Core Diameter mm	Hole Diameter mm
AQ	27.0	48.0
BQ	36.5	60.0
NQ	47.6	75.7
HQ	63.5	96.0
PQ	84.0	122.6
CHD 76	43.5	75.7
CHD 101	63.5	101.3
CHD 134	85.0	134.0

1 inch = 25.400mm

- Le plus petit diamètre des standards industriels des échantillons est de 27mm.
- Les standards les plus souvent rencontrés sont le NQ et CHD 76.



- Le module est conçu avec un cœur creux afin de pouvoir y passer une corde ou un câble électrique.
- Le diamètre du passage au centre est indéterminé.

3 Revue des principes de déplacement des robots d'inspection de conduites

Après les recherches documentaires effectuées, il a été établi que les robots d'inspection de conduites sont les appareils qui se rapprochent le plus du module de déplacement. Les parois du forage faisant office de conduite.

3.1 Choix du principe de locomotion

Inch Worm

4 Mécanisme d'accrochage du mécanisme de type vers et de la poulie

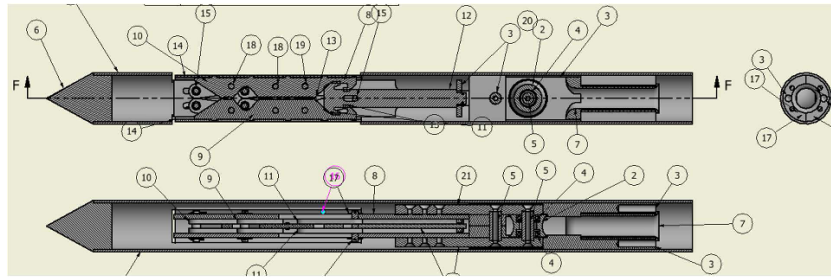
Un mécanisme à membrure munis de sabot a été sélectionné. L'avantage du mécanisme à sabot est la possibilité d'avoir une grande surface de contact avec les parois du forage sans point de contrainte concentré. Les parois du forage pouvant être instables ou friables.

4.1 Mécanisme de type vers

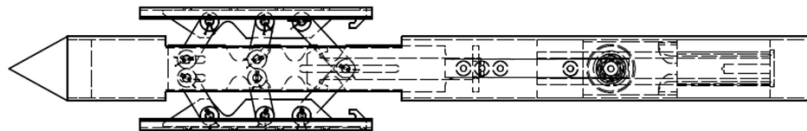
Le mécanisme de type vers nécessite deux points d'accrochage intermittent. Les mécanismes à membrure, chacun motorisés par un moteur linéaire tubulaire, permettent de déployer et contracter les sabots au moments opportuns.

4.2 Mécanisme pour la poulie

Arrivé au bout de sa course, le module déploie le troisième mécanisme d'accrochage. Ce dernier est retenu fermé par une barrure. Lorsque la barrure est enlevée le système se déploie. Un ressort remplace le moteur linéaire puisque la poulie sera laissée en place ce qui nécessite un déploiement unique.



Les systèmes à membrure est conçu pour que le système d'attache soit auto-bloquant. Les différentes membrures et glissière permettent l'autoblocage sur une large plage de diamètre.



5 Les moteurs exploratoires

La construction du module est possible seulement si on a une motorisation adéquate. N'ayant aucune expérience a priori, des moteurs exploratoires ont été construits afin de cerner les paramètres qui sont critiques lors de la conception, la fabrication et du fonctionnement d'un moteur électrique.

Cette section décrit les différents moteurs construits et élabore sur les difficultés rencontrées.

Les types de moteurs explorés sont :

- Moteur rotatif à arbre creux
- Moteurs linéaires tubulaires à induction TLIM
- Moteur linéaire à enroulement et aimant permanent (voice coil, VC, BDLC)
- Chaîne magnétique

Les moteurs exploratoires sont présentés dans l'ordre de l'exploration/développement chronologique.

5.1 1^{er} moteur exploratoire : Moteur rotatif à arbre creux

Le moteur rotatif à arbre creux a été envisagé initialement. L'idée a été abandonnée dû à la complexité de passer les conducteurs électriques sur plusieurs mètres de long en contournant plusieurs pièces en rotation. Cela impliquait une fabrication fastidieuse des enroulements et la grande difficulté de faire une réparation. Le vernis sur les fils de cuivre est sensible à l'abrasion et toutes les surfaces en contact avec ce type de fils doivent être lisses et arrondies. On peut remarquer les coins à angle droit sur les pôles du moteur de la photo suivante. Il y avait un court-circuit avant même d'avoir complété les enroulements. Les fils des enroulements sortaient constamment du pôle lors de la fabrication des bobines. Des gabarits d'enroulement ont été fabriqués pour créer des enroulements fixés à l'aide d'époxy. Après l'insertion d'un premier enroulement, la difficulté d'amener l'alimentation au bobinage est apparue problématique puisqu'il faut contourner les pièces en mouvement. La solution envisagée était d'utiliser un tube double paroi à l'intérieur. Solution qui a été utilisée pour un des moteurs qui suivent.



5.2 2^e moteur exploratoire : TLIM V1

Les moteurs TLIM étaient le premier choix de moteur linéaire dû à leur simplicité de fabrication apparente. Cependant plusieurs difficultés ont été rencontrées et cela a retardé leur exploration.

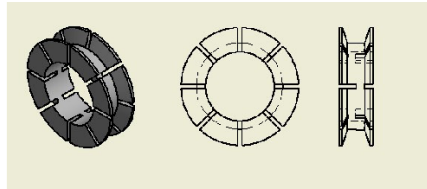
La première version TLIM a été abandonnée dû à l'impossibilité de réaliser les bobines sans endommager le vernis des fils.

5.3 3^e moteur exploratoire : TLIM V2

Toutes les pièces pour TLIM V2 ont été fabriquées incluant les bobines. La construction du TLIM V2 a été mise de côté à cause des difficultés de branchement des bobines. Effectuer les branchements par les trous dans le tube à double paroi du stator s'est avéré trop complexe. Les risques de dommage au verni des fils a été estimé trop élevé. Il est aussi très difficile d'installer les capteurs de température avec cette configuration.

5.3.1 Le cœur magnétique tranché du primaire

La lamination des cœurs magnétiques est un facteur important pour éliminer les pertes par courant de Foucault. Le prototype TLIM V2 n'est pas un cœur laminé. Le circuit magnétique de TLIM V2 sera tranché afin de diminuer les pertes. Selon Boldea, l'utilisation de 4 fentes permet de réduire les pertes par courant de Foucault par un facteur d'environ 6. Cette solution est adoptée pour TLIM V2 parce qu'il est possible d'utiliser les fentes pour y faire passer les câbles d'alimentation des bobines. Le cœur a été morcelé par bobine afin de faciliter le tranchage. Le cœur magnétique du primaire de TLIM V2 est composé de pièces du type illustré sur l'image qui suit. Ces pièces sont aussi le support des bobines.



Cette configuration permet l'installation de roulement inter bobine (non montrées). Les roulement inter bobine sont un support pour le rotor lorsque celui-ci est soumis à des force radiales. Les rouleaux inter bobine remplacent les roulements linéaires sans utiliser le même espace. Le roulement s'appuie directement sur la surface interne du curseur afin qu'il ne fasse pas contact avec les pièces fixes du stator. Les roulements inter bobine sont recouvert d'une couche plastique pour éviter d'endommager le rotor.

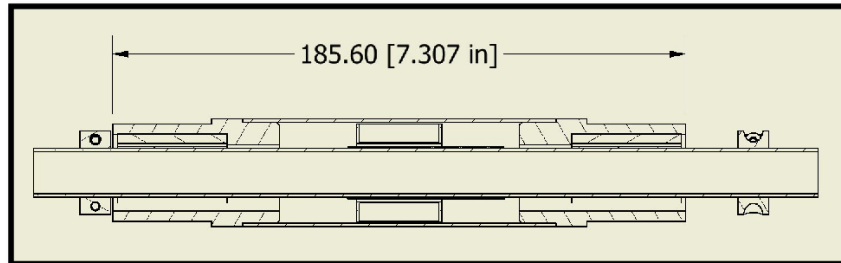
5.4 4^e moteur exploratoire : Chaîne magnétique #1 (CM1)

La chaîne magnétique est une bobine principale avec une multitude de petits disques reliée entre eux par un matériel souple non conducteur magnétique. Lorsque la bobine est alimentée les disques se collent un après l'autre sur la bobine diminuant la longueur totale de la chaîne. Les résultats de ce prototype n'ont pas été concluants. Les disques doivent être mince, très lisse et plat. Il a été difficile de conserver les disques plats avec tous les trous et passages pour le cordon de la chaîne. Le principe fonctionne, cependant le déplacement utile est limité par le grand nombre d'interface air-métal. La force diminue rapidement du à la multitude de petit gap entre les disques.

5.5 5^e moteur exploratoire : VOICE COIL #1 (VC1)

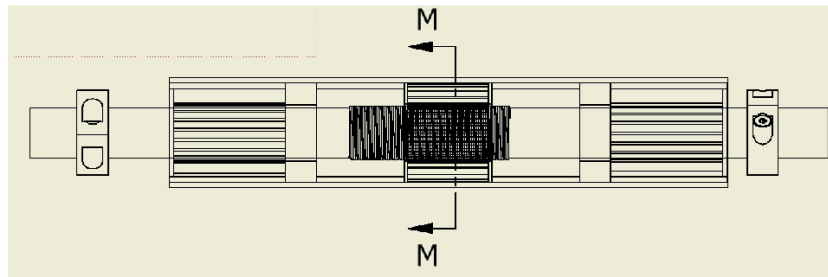
Voici la première ébauche pour les modèles VOICE COIL.

Les pièces pour adapter les roulements demandent beaucoup d'usinage. Le matériel des supports est lourd et inactif pour la force du moteur. La densité énergétique serait basse et les coûts de fabrication élevés.

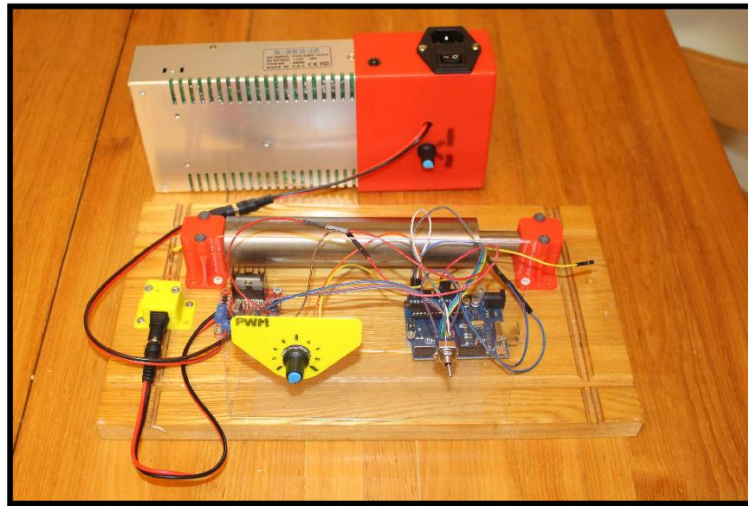


5.6 6^e moteur exploratoire : VOICE COIL #2 (VC2)

Cette version est optimisée pour l'impression 3d. L'usinage de pièces métallique est au minimum. Seulement les deux tubes et deux anneaux forment le circuit magnétique. Les deux tubes sont structurels. La puissance passe à l'intérieur du tube. Le tube à paroi double a été abandonné afin de pouvoir effectuer des tests de performance.



On voit sur l'image suivante le VC1 et l'interface avec le processeur. Cette interface est une simple source PWM pour effectuer des tests de force. L'alimentation est de 12V.



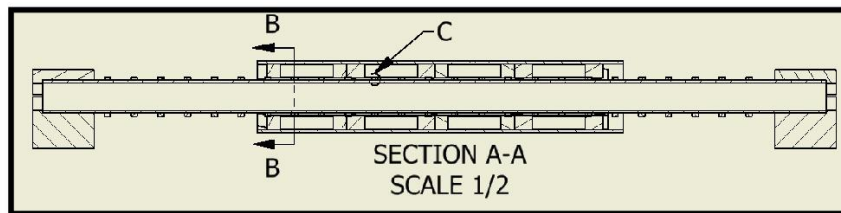
Les tests effectués sur VC2 sont superficiels. Il n'y a pas eu de test de performance électriques. Ce modèle ne possède pas de capteur de température. Un test de force de 10N (soulève 1kg) a été effectué. Pour ce test il avait surchauffé donc cette force pourrait être utilisée seulement de façon intermittente.

Ce modèle possède un seul assemblage d'aimants et est monté sur roulements linéaires à bille. Les roulements sont très efficaces. Il y a très peu de friction et très peu de jeux

5.7 7^e moteur exploratoire : VOICE COIL #3 (VC3)

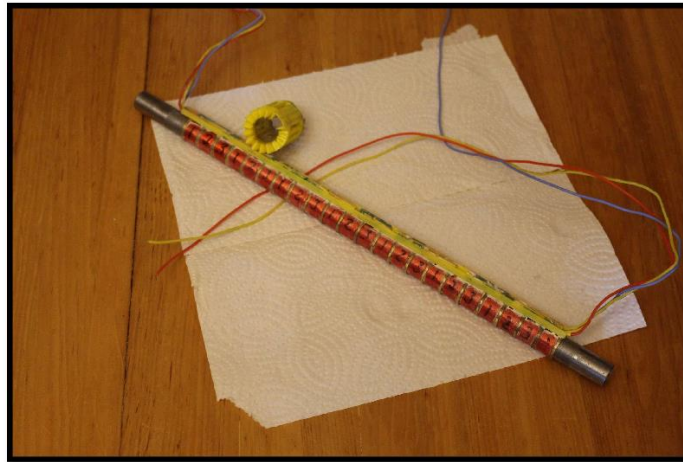
Le modèle VC3 contient 4 séries d'aimant sur la même longueur de curseur que VC2.

Les roulements à bille ont été remplacés par des bagues qui servent de cousin de glissement contre la surface du curseur. Cette surface est en plastique et on peut constater une plus grande friction. Les difficultés rencontrées avec TLIM2 pour effectuer les branchements des bobines a travers les trous dans le stator ont été rencontré aussi. De plus les trous dans l'acier du stator constituent des points d'accrochage du champ magnétique des aimant permanent. Cette version a été testé sommairement. Les points d'accrochage étant très problématiques, aucun test de charge n'a été effectué.

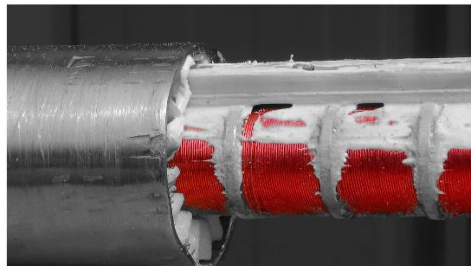


5.8 8^e moteur exploratoire : VOICE COIL #4

La version VC4 est une modification de VC3 pour permettre le branchement des enroulements dans un rail.



Le rail crée un débalancement du champ magnétique puisqu'il n'y a pas d'aimant où se situe le rail. Ce deuxième modèle confirme que la continuité et la symétrie du circuit magnétique sont très importants pour les moteurs avec des aimants permanents. Dans ce cas, il n'y a pas de point d'accrochage du champ magnétique. Cependant, la friction est très grande due à la force des aimants qui ne sont pas contrebalancés par d'autres aimants due à la présence du rail. Ce modèle a été abandonné sans effectuer aucun test. Il était très difficile de faire glisser le curseur qui cherchait à se coller sur le stator du au débalancement du champ.



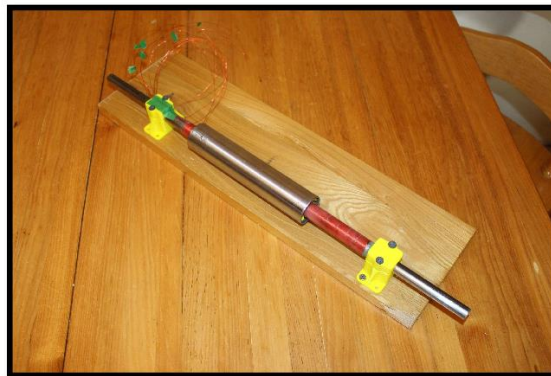
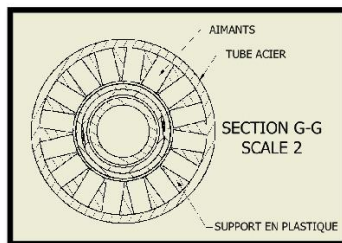
5.9 9^e moteur exploratoire : VOICE COIL V5 (VC5)

La version est semblable à V4 ou le chenail est remplacé par des encoche dans les bagues de cuivre.

Ce modèle n'a pas été testé puisque lors de sa construction un incident a détruit une partie des enroulements. Le problème de débalancement du champ magnétique était encore présent. Les bagues de cuivre sont diamagnétiques. Enlever une encoche dans celle-ci occasionne un débalancement du champ. Le débalancement est faible mais très bien perceptible. Il y avait une friction accrue. Il faut donc aussi tenir compte des matériaux diamagnétiques pour établir la symétrie du champ magnétique. VC5 n'a pas été complété et a fait place à VC6.

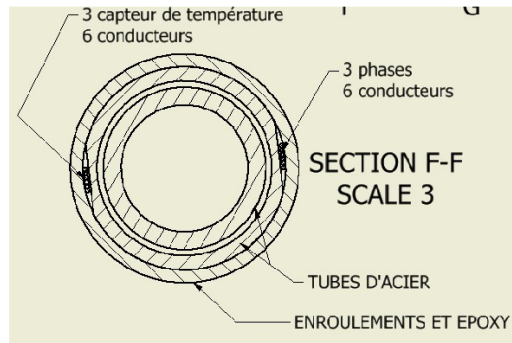
5.10 10^e moteur exploratoire : VOICE COIL 6 (VC6)

Les bagues de cuivre sont éliminées et les enroulements sont recouvert d'époxy pour servir de surface de glissement. Le stator possède 21 bobines distinctes avec des polarités en alternances par groupe de 3 (1 par phase). Les enroulements sont fixés au tube d'acier à l'aide de colle (crazy glue) avant d'être recouverte d'époxy. La couche d'époxy est appliquée sur le tube en rotation afin d'obtenir une circonférence uniforme.



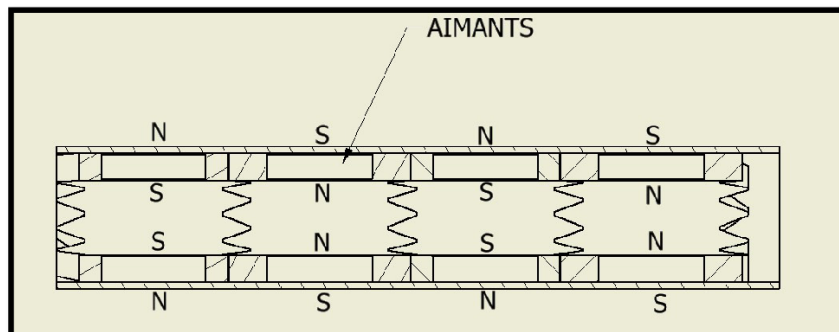
UQAT Module de déplacement des sondes

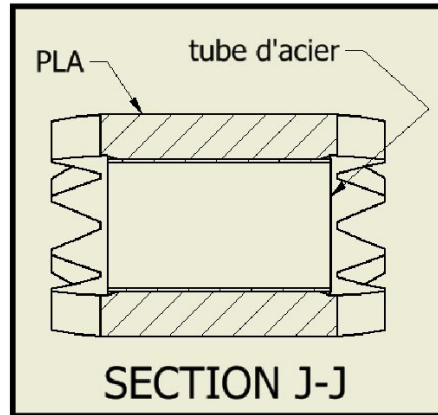
Cette version est munie de 3 capteurs de température intégrés sous les enroulements. Le tube du stator est modifié avec des plats pour laisser un espace pour les conducteurs sans modifier le diamètre des enroulements. Cela permet d'obtenir une couche d'époxy uniforme.



La méthode qui a été utilisée pour faire les enroulements permet de réaliser ceux-ci en continu. Cela enlève donc le problème de branchement des bobines individuelles.

Le curseur de VC6 est similaire à celui de VC3 à l'exception de l'ajout de tube d'acier à l'intérieur de support à aimant pour servir de surface de glissement. La symétrie et l'uniformité des stator et curseur font en sorte qu'il n'y a pas de point d'accrochage magnétique. La friction de glissement est non négligeable mais acceptable avec un lubrifiant.





Ce modèle a besoin d'un encodeur de position pour les changements de polarité des enroulements. 2 des 3 capteurs de température sont fonctionnels. Il est impossible d'effectuer une réparation. Le tout est fixé dans l'époxy. L'interface avec l'encodeur linéaire (vernier électronique) pour synchroniser le changement des phases avec le déplacement du curseur n'était pas assez rapide. Le moteur se déplace de façon saccadée. Il s'arrête le temps de recevoir sa nouvelle position. L'encodeur linéaire a été remplacé par un potentiomètre connecté directement sur une entrée analogique du microcontrôleur. Les capteurs de température permettent de gérer la surcharge des bobines. La variation des phases permet de simuler une bobine de longueur infini pour chaque groupe d'aimants.

La configuration de VC6 permet de construire un moteur d'une longueur considérable. Il consiste en une suite de moteur de type VC2. La force de ce moteur devrait être supérieure à VC2.

On remarque que lorsque le moteur surchauffe l'époxy se ramollie et la friction augmente. La température des enroulements aussi pourrait avoir un effet sur la durabilité de l'époxy. L'ajout de surfaces de glissement serait une façon palier à ce problème.

La force de traction espérée pour VC6 était de 30N (3kg) par intermittance. La longueur du curseur est de 175mm (7pouces). Les tests effectués donnent une force d'environ 1N (1kg) ce qui est équivalent à une seule bobine de VC2. La friction est plus importante que prévue, ce qui nous mène à exclure les coussins de frottement pour les prochaines versions. La synchronisation de la source est aussi en cause d'où l'importance d'un encodeur adéquat et d'une programmation possiblement plus complexe que présentement.

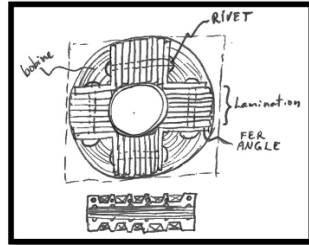
5.11 11^e Moteur exploratoire : TLIM V3

Le TLIM V3 est le dernier moteur linéaire exploratoire. Dans ce modèle on a tenté d'intégrer tous les points jugés important dans les moteurs exploratoires précédent. Pour la conception de TLIM V3 les pièces du stator ont été conçue avec le principe lamellaire plutôt que des pièces usinées. Les pièces lamellaires seront découpées au laser par une compagnie spécialisée dans la découpe. Il n'a pas été possible de se procurer d'acier électrique pour la fabrication et un acier doux a été sélectionné en remplacement.

Dans TLIM V3 un espace pour les fils d'alimentation est prévu dans les 4 coins des cornières d'acier. Cela permet d'avoir un moteur d'une longueur très grande. On remarque que le fait que l'acier du stator

UQAT Module de déplacement des sondes

soit à l'intérieur des bobines simplifie la fabrication. Avec cette configuration toutes les bobines de ce modèle peuvent être enroulées en même temps directement sur le cœur. Il faut noter que dans tous les documents consultés cette configuration n'a pas été rencontrée. Le cœur laminé est en développement et son implémentation sera établie selon les calculs d'optimisation. Les laminations sont conçues de façon à permettre le passage des câbles électriques.



Les capteurs de température sont facilement installables et remplaçables. La réparation d'une seule bobine est possible. Des roulements seront intégrés dans les lamelles à intervalles réguliers. Des roulements en céramique seront utilisés pour éviter de créer un contact électrique entre le curseur et le stator. Tout le matériel précédent est actif (magnétique et électrique) en étant en même temps structurel ou fonctionnel (roulement). Le câblage électrique est simple et peut se faire sur toute la longueur du moteur sans obstruction. Le moteur TLIM V3 aura des coûts de réalisation plus importants que les précédents. Pour cette raison des calculs d'optimisation doivent être réalisés pour éviter le cas VC6 ou beaucoup d'effort ont mené à aucun avantage. Les calculs d'optimisation pour TLIM V3 maximiseront la force de traction à l'arrêt.

5.12 Conclusion pour les moteurs exploratoires

Les obstacles rencontrés dont il faut tenir compte lors de conception sont :

- Le vernis des fils qui servent à fabriquer les enroulements n'est pas très résistant. Il faut absolument le protéger contre l'abrasion et les arrêtes pointues ou coupantes.
- Le passage des câbles d'alimentations sur toute la longueur du moteur.
- Les points d'accrochage dus aux asymétries magnétiques.
- La friction des coussins de glissement
- La synchronisation de la source avec la position du curseur
- La complexité de réalisation des enroulements
- Il faut tenir compte des matériaux magnétique, ferromagnétique et diamagnétique lorsqu'on analyse la symétrie du champ magnétique.

6 Calculs de conception et d'optimisation du moteur TLIM V3

Les calculs d'optimisation du moteur linéaire doivent tenir compte des contraintes mécanique, électrique, magnétique et thermique. Cette analyse d'optimisation est réalisée selon la méthode des domaines de puissance. La méthode utilisée pour optimiser le modèle est inspirée des graphes de liaisons et adaptées pour un traitement similaires aux éléments finis. Les éléments sont définis avec des paramètres par morceau (lump parameter).

La méthode utilisée fait partie d'une maîtrise réalisée en parallèle avec ce projet. Plusieurs difficultés se présentent et ralentissent le processus.

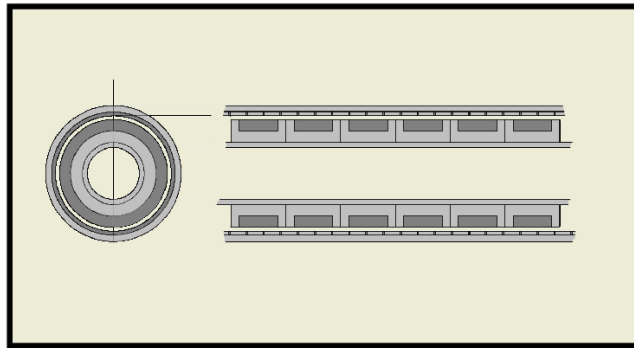
6.1 Introduction

Ce chapitre présente une étude sur la conception préliminaire d'un moteur linéaire à induction avec un curseur composite. Les divers phénomènes seront approchés d'une façon graphique pour faciliter la visualisation des phénomènes.

Le but de ce document est d'établir une méthode séquentielle répétable pour la conception des modèles, la construction des équations et le traitement des calculs. La réalisation d'un prototype basé sur ces calculs permettra de déterminer la validité de ceux-ci. Pour l'application visée, on cherche les dimensions pour obtenir la plus grande poussée possible lorsque le moteur est à l'arrêt.

6.2 Le modèle mécanique

L'image suivante montre le modèle préliminaire du moteur TLIM V3.



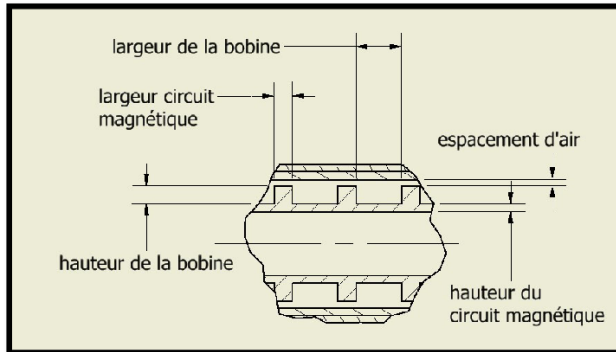
Les parties en gris foncé sont les conducteurs électriques et les parties en gris pâle sont l'acier.

Pour le design du moteur on essaie de produire la plus grande poussée possible avec les limitations dimensionnelles prescrites. Ces limitations sont les suivantes :

-Diamètre extérieur : Doit s'insérer dans un trou de forage.

-Diamètre intérieur : Doit permettre le passage des câbles.

6.2.1 Quelles sont les dimensions pour une traction maximale?



Selon Mamoud les caractéristiques principales pour obtenir la plus grande traction sont :

-L'utilisation d'un secondaire composite avec un ratio conducteur/pas des créneaux du secondaire, entre 0.075 et 0.1 pour des anneaux conducteurs de cuivre, bronze et aluminium.

-L'utilisation de plus de 6 créneaux par longueur de phase du primaire

-L'utilisation d'anneaux d'épaisseur radiale minimale. Pour une question pratique pour la fabrication cette épaisseur radiale est fixée à 1mm.

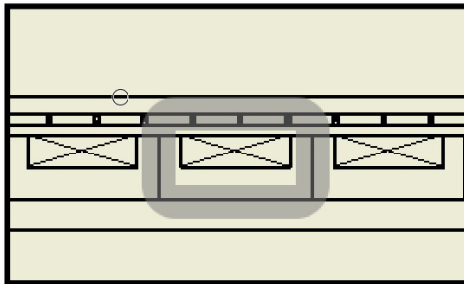
Ces paramètres seront utilisés comme valeurs initiales dans les calculs itératifs.

6.3 Effet de l'inductance des composantes sur la force maximale

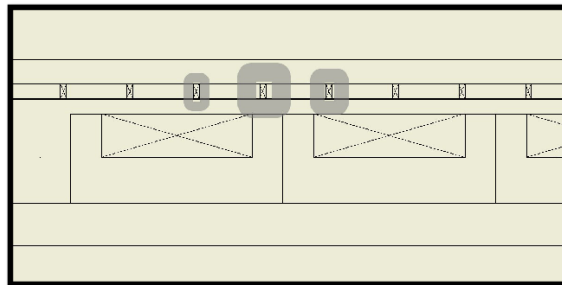
Par observation on sait que la force mécanique entre deux aimants est plus forte lorsque ceux-ci sont au plus près l'un de l'autre. On sait aussi que plus les aimants sont forts et plus cette force est grande.

Dans un moteur à induction pour obtenir la force maximale on fait l'hypothèse que la situation est similaire à celle des aimants. Il faut obtenir la plus grande densité du champ magnétique, donc de courant, lorsque les pôles sont au plus près.

Si on suppose le moteur en blocage. On suppose que le circuit magnétique lorsqu'on applique un courant sur la bobine primaire correspond approximativement à la partie en gris. La bobine possède une composante résistive et une composante inductive.



La bobine primaire est alimentée par un courant alternatif. Le flux du primaire varie en fonction de ce courant. Cette variation produit l'induction d'une tension dans le secondaire et il en découle un courant dans les anneaux conducteur du secondaire. Cette tension est plus ou moins intense en fonction de la proximité avec le pôle du primaire ce qui est aussi vrai pour le courant qui en découle. Le champ magnétique du secondaire est proportionnel à ce courant. L'image suivante illustre cette affirmation où les champs magnétiques sont en gris.

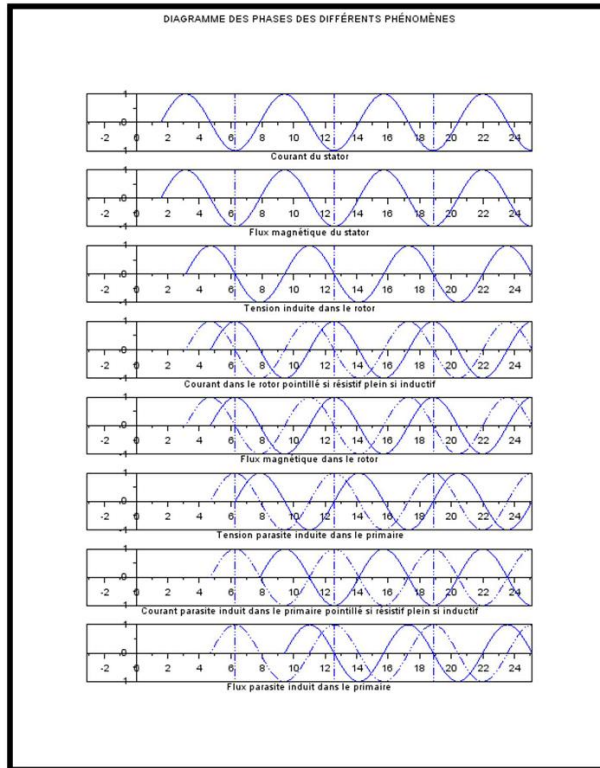


On sait que la tension induite subit un déphasage de 90 par rapport au flux qui la produit. Selon l'équation de

On sait que le courant subit un déphasage par rapport à la tension en fonction de l'impédance du circuit.

Posons l'hypothèse que les conducteurs qui subissent une induction sont en fait des sources de tension. Par le principe de superposition il est possible d'analyser l'effet de chaque source sur leur circuit respectif.

Le graphique suivant montre l'effet de l'impédance des composantes sur la synchronisation de l'intensité des pôles.



6.3.1 Observations sur les flux magnétique.

Lorsqu'on observe les courbes de flux magnétique on observe :

Le flux parasite est à l'inverse du flux principale si l'impédance des stator et rotor sont essentiellement résistives. Ce qui diminue l'intensité du pôle du stator.

Le flux parasite est en avance de $\pi/2$ sur le flux principal si le stator et le rotor ont une impédance essentiellement inductive.

Le flux du rotor est à l'inverse du flux principal lorsque le rotor a une impédance essentiellement inductive.

Le flux parasite peut être synchronisé avec le flux principal en ajustant l'inductance des composantes.

L'impédance est modifiable par la variation de la quantité d'acier et par la variation de la fréquence.

Basé sur ces observations posons l'hypothèse que la force maximale serait obtenue en utilisant un rotor le plus inductif possible afin d'opposer complètement les pôles du primaire et du secondaire. Afin de

conserver la plus grande magnitude du flux primaire il faut ajuster l'impédance du rotor pour synchroniser le flux parasite avec le flux principal.

6.4 Identification des constantes et variables

Dans un espace cylindrique(r, θ, z), le moteur est orienté de façon que l'axe des z corresponde à l'axe de déplacement du rotor.

Diamètres : Les diamètres identifiés par la lettre « D », corresponde à des dimensions dans l'axe r et correspondent à deux fois le rayon.

Rayon : Les rayons identifiés par la lettre « R », correspondent à des dimensions dans l'axe des r .

Perméabilité : La perméabilité sera identifiée par la lettre grec « μ ».

Résistivité : La résistivité sera identifiée par la lettre grec « ν »

Longueur : Les longueurs identifiée par la lettre « L », correspondent toujours à une dimension dans l'axe des z .

6.5 Les valeurs constantes :

Diamètre extérieur du moteur

Diamètre intérieur du cœur

Perméabilité de l'air

Perméabilité relative de l'acier

Perméabilité relative de l'aluminium

Conductivité du cuivre

Conductivité de l'aluminium

Conductivité de l'acier

6.6 Les variables :

Diamètre intérieur du rotor

Diamètre extérieur des anneaux conducteur du rotor

Longueur des anneaux conducteur du rotor

Annexe A : Les prototypes exploratoires (P1MKx)

Afin de cerner les contraintes du projet une approche pratique a été utilisée. Plusieurs moteurs exploratoires ont été fabriqués. Il y a aussi de modules exploratoires qui ont été construits. Ils sont qualifiés d'exploratoires parce qu'ils ont été fabriqués avec la contrainte de minimiser les coûts et pouvaient être fabriqués avec les outils disponibles.

Les prototypes à came étaient destinés à faire des premiers essais avec un imprimante 3d. Trois versions du modèle à came ont été imprimées. La première impression n'a jamais été complètement fonctionnelle à cause de la conception qui présentait certaines limitations qui ont été corrigées dans la deuxième version. Les tolérances d'impression ont été ajustées pour la deuxième impression. La première version a été fonctionnelle une seule fois. Le bris d'une des pièces principales lors du second assemblage est la cause de l'arrêt de fonctionnement et de développement. La complexité de l'assemblage était un problème significatif. Certains ajustements/tolérances des dimensions devaient être corrigés pour que l'impression en 3d soit assez solide. La deuxième version est fonctionnelle. Ce prototype a une conception et une utilité équivalente à un jouet. Ce deuxième prototype permet de bien cerner la problématique liée à l'utilisation de ce type de mécanisme dans un trou de forage. La fabrication des prototypes a permis de mieux cerner les capacités de l'impression 3d.

6.6.1 Questions à répondre

- Pourquoi construire un prototype?
- Quelle sont les critères de développement du prototype?
- Quelles sont les caractéristiques particulières du prototype à cames?
- Est-ce que le modèle à came est utilisable dans les conditions de sondage?

6.6.2 Pourquoi construire un prototype

La construction du prototype sert à :

- Apprendre à faire du prototypage avec une imprimante 3d.
- Valider certaines hypothèses.
- Avoir une expérience pratique pour mieux saisir les limitations du modèle à cames.
- Avoir une expérience pratique pour mieux saisir les limitations du déplacement comme un vers.
- Montrer quelque chose de concret au client.

6.6.3 Quelle sont les critères de développement du prototype?

- Le modèle à cames sera réalisé/inspiré selon les croquis fournis par Marin.
- Le premier prototype sera construit en minimisant les coûts.
- Le prototype a été réalisé en plastique (PLA) par impression 3d afin de minimiser les coûts de réalisation.
- Le moteur utilisé est un moteur électrique de petite puissance afin de limiter les coûts et le plastique, PLA (acide polylactique), ne pourrait pas prendre une très grande charge.

6.6.4 Quelles sont les caractéristiques particulières du prototype à cames?

- Les deux mouvements contrôlés par les cames sont l'avance et l'accrochage. La nature des cames fait en sorte que les déplacements sont fixes et difficilement ajustable sans modifier la came. Dans les conditions d'un forage le diamètre est variable. L'ajustement devra se faire par l'intermédiaire d'un autre mécanisme.

- Le système d'accrochage utilise des cames radiales. Pour le système d'accrochage il est possible d'utiliser des ressorts pour ajuster le diamètre. Le mécanisme à came sert à contrôler la force appliquée perpendiculairement aux parois.

UQAT Module de déplacement des sondes

L'avance utilise une came axiale. Dans le cas de l'avance le petit diamètre du module limite l'amplitude de déplacement.

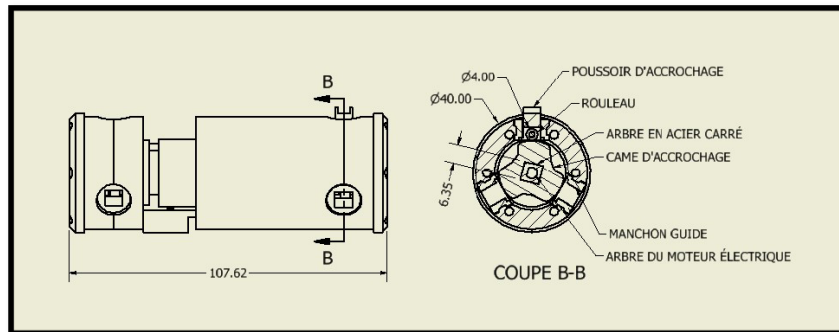
6.6.5 Est-ce que le modèle à came est utilisable dans les conditions de sondage?

Après la réalisation du prototype et d'essais sommaires dans une conduite en plastique la conclusion est que le modèle à cames est mal adapté à l'utilisation dans les forages de petit diamètre principalement à cause du caractère fixe des cames. L'espace restreint limite l'applicabilité puisque les cames sont de petite dimension. Les angles de blocages sont rapidement atteints lorsque on tente d'augmenter l'amplitude des mouvements directement avec les cames.

6.6.6 Prototype#1 version1(P1mk1)

Il n'y a pas de série de dessins détaillés pour P1mk1.

Dimensions générales de P1mk1.



La première version du prototype#1 a principalement servi à la familiarisation avec l'imprimante et avec la conception pour l'impression 3d.

- L'imprimante est une Alunar M506 (clone prusa i3), coût d'acquisition 350\$ en kit à assembler.
- Temps d'assemblage de l'imprimante approx. 8 heures.
- Les dimensions maximale des pièces pour l'imprimante sont de 200mm x 200mm x 200mm.
- « Splicer » utilisé Cura version 14.07.

Observation :

- Les parties en suspension subissent une déformation non négligeable même en présence de support.
- Les pièces très longues subissent des déformations dues à la contraction du plastique lors refroidissement.
- La précision dimensionnelle de l'impression est d'environ $\pm 0,1mm$ dans des conditions idéales.
- Les pièces ont un fini de surface ondulé à cause du procédé couche sur couche.
- Des opérations d'usinage sont requises pour certaines surfaces afin de compenser pour la précision.
- Le temps d'impression peut être très long pour avoir une bonne précision (5heures pour une pièce)

Conception :

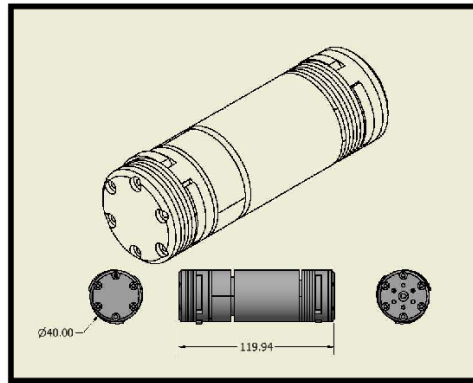
- Les pièces sont conçues avec le logiciel Inventor professionnel 2017 version étudiante.
- Les pièces sont conçues afin d'éviter les parties en suspension.

UQAT Module de déplacement des sondes

- Les pièces sont conçues afin de faciliter l'impression sur une surface plane.
- Les pièces sont conçues afin de minimiser l'impact de la précision de l'imprimante.
- Les pièces sont conçues afin de minimiser les opérations d'usinage.

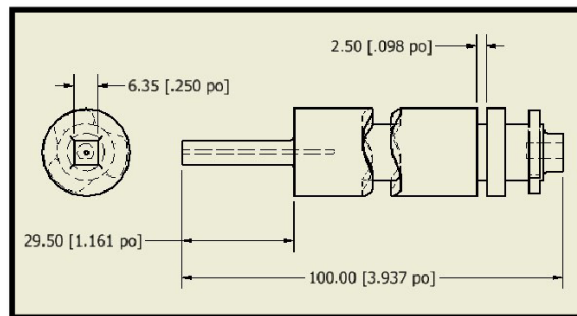
6.6.7 Prototype#1 version 2 (P1mk2)

6.6.8 Dimensions générales de P1mk2.



6.6.9 Arbre principal et came d'avancement

Le pas du système est limité par la came d'avancement. La configuration de la came d'avancement a été établie afin d'utiliser une seule came d'accrochage. Ce choix diminue le nombre de pièces et les détails de conception mais limite le pas du module parce qu'il doit faire plusieurs oscillations sur la même rotation. Le pas du module aurait été environ 3 fois plus grand si les cames d'accrochage avaient été séparées. Il y aurait eu dans ce cas une seule oscillation par tour.

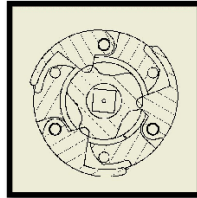


6.6.10 Came et levier d'accrochage

Les leviers d'accrochage sont conçus pour que le prolongement agisse comme un ressort ce qui permet une certaine flexibilité pour le diamètre d'accrochage. On remarque que les cames peuvent tourner dans une seule direction pour fonctionner. Le module peut seulement avancer. Cette limitation est due à la

UQAT Module de déplacement des sondes

came qui actionne les trois leviers. L'utilisation d'une came pour chaque levier aurait permis d'avoir un angle de fonctionnement plus grand et de concevoir une came bidirectionnelle. Cela aurait aussi permis une plus grande amplitude de mouvement des leviers.



6.6.11 Conclusions

-Le design initial d'un modèle est le processus qui prend le plus de temps. (24 à 36 heures de modélisation)

-L'utilisation d'une imprimante 3d permet un prototypage peu dispendieux.

-Coût du filament de plastique pour un prototype complet environ 5\$

-Une modification majeure des dimensions au concept de base prend environ 2 heures

-Le temps total d'impression est d'environ 20h pour un prototype avec une imprimante de basse gamme.

-La solidité des pièces en PLA est un facteur limitant.

-La rapidité de l'impression limite la rapidité du processus de prototypage et de modification.

-Le choix d'utiliser une seule came pour actionner les bras d'ancrages amène des limitations pour les cames.

-Le développement d'une version 3 avec une seule oscillation par tour et une came pour chaque levier ne serait pas utile dans la situation présente.

-Le développement d'un autre modèle avec un accrochage constant et une amplitude de pas supérieure (remplacer la came par une vis et un contrôleur de rotation pour le moteur) augmenterait la vitesse de déplacement.

-La dimension du module limite la dimension du moteur. Le couple d'un moteur dépend de son diamètre. Il faudra utiliser plusieurs moteurs à grande vitesse et des réducteurs de vitesse pour obtenir la puissance et la vitesse de déplacement désirée.

-L'utilisation d'un moteur linéaire éviterais d'avoir à transformer le mouvement de rotation.

-L'utilisation d'un CCC est envisageable pour remplacer les réducteurs de vitesse. La configuration connue ne pourrait pas être utilisée.

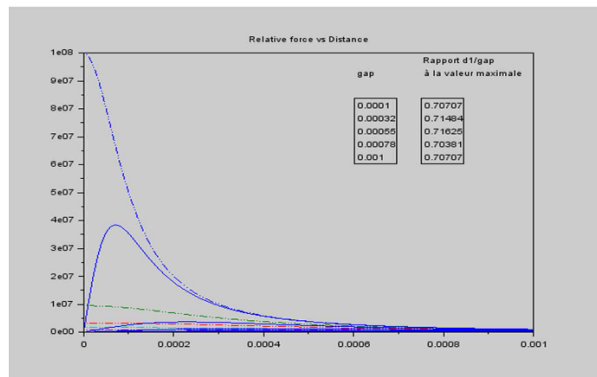
-L'utilisation d'un CCC est envisageable pour remplacer les réducteurs de vitesse. La configuration connue ne pourrait pas être utilisée. Le développement d'une autre version du CCC serait requis. Le développement d'un CCC linéaire est envisageable.

7 Annexe B : Effet de la position des pôles sur la force maximale

Dans la configuration d'un moteur linéaire (ou autres moteurs) les pôles sont au plus près lorsqu'ils se trouvent directement vis-à-vis l'un de l'autre et les forces mécaniques sont alors à leurs plus haut. Ces forces ne produisent cependant aucun travail puisqu'elles sont appliquées perpendiculairement au déplacement. Observons l'effet de l'angle entre les forces et l'axe de déplacement.

7.1.1 Tracé de la composante en Z de la force

Pour se donner une idée de la composante utile de la force on trace la courbe pour différentes valeurs de gap :



7.1.2 Observations

On remarque qu'il y a une relation entre le gap et la position de la valeur de la composante z maximale.

On remarque que le rapport entre le gap et la distance entre centre est à peu près constante pour la valeur maximale de la composante en Z de la force.

Pour une force à peu près constante il faut un nombre de pôle suffisant au rotor. Par exemple si on a un pas entre les pôles du secondaire égal à celui du primaire. Il y aura une partie du déplacement où la force sera très grande et une autre où la force sera très faible.

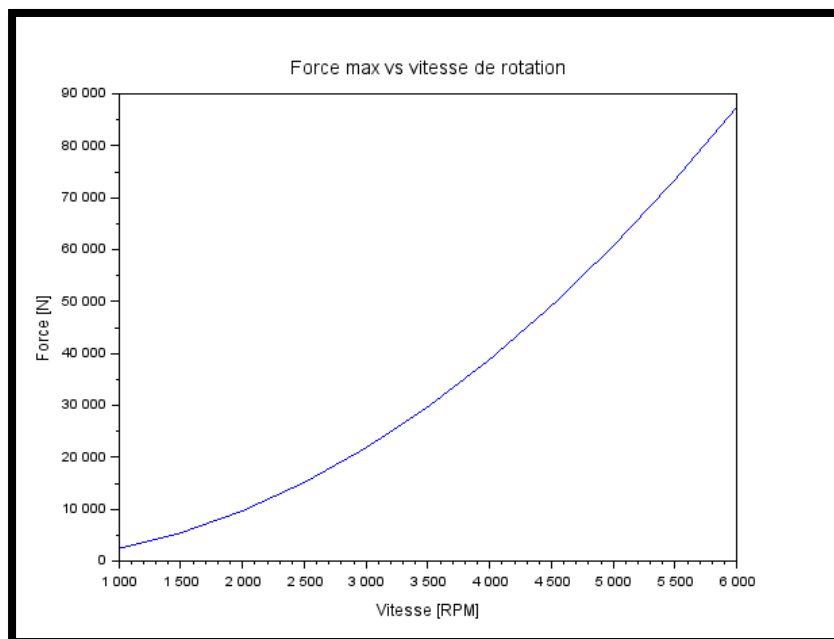
Si on augmente le nombre de pôles au secondaire à un très grand nombre. Le champ sera entrecoupé par une multitude de conducteur et la densité du champ sera plus basse dû au fait que le gap équivalent sera plus grand.

Si on augmente le nombre de pôles au secondaire, on diminue la longueur des pôles. On diminue par le fait même la reluctance du rotor (tel que présenté dans la discussion précédente) puisque les pôles du rotor seront plus rapprochés ce qui diminue la quantité d'acier pour un pôle.

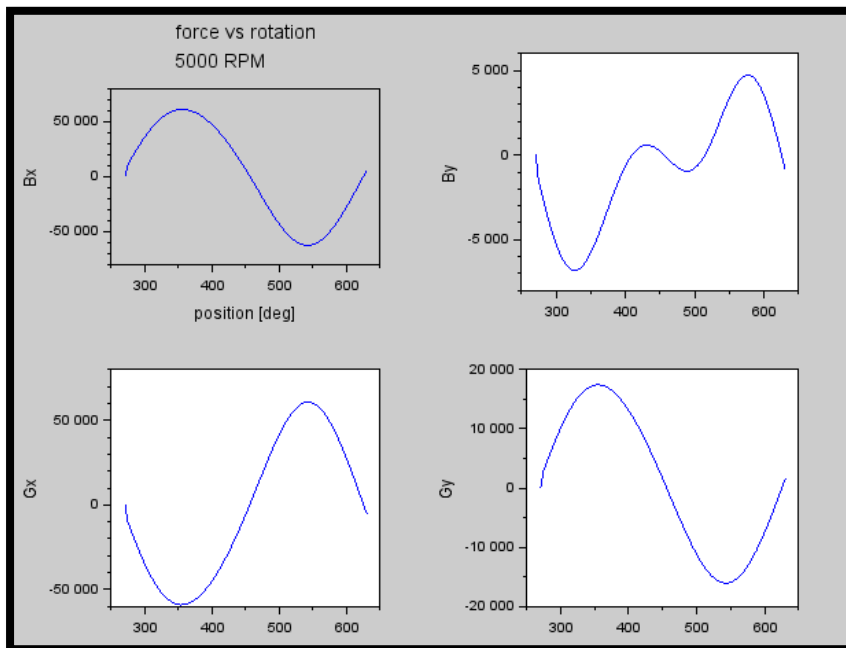
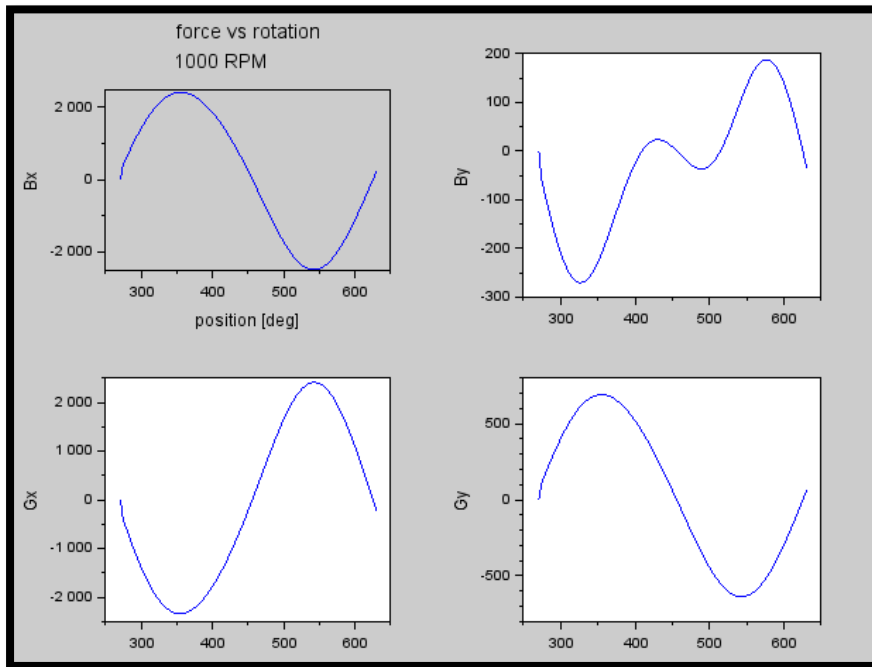
On observe qu'augmenter le nombre de pôles rend la force plus uniforme. Cela réduit l'intensité maximale par la baisse de l'inductance et augmente l'intensité minimale en diminuant la distance maximale entre les pôles. L'augmentation du nombre de pôle diminue la distance entre un minimum et un maximum.

ANNEXE C : CALCUL DMC CCC TYPE A

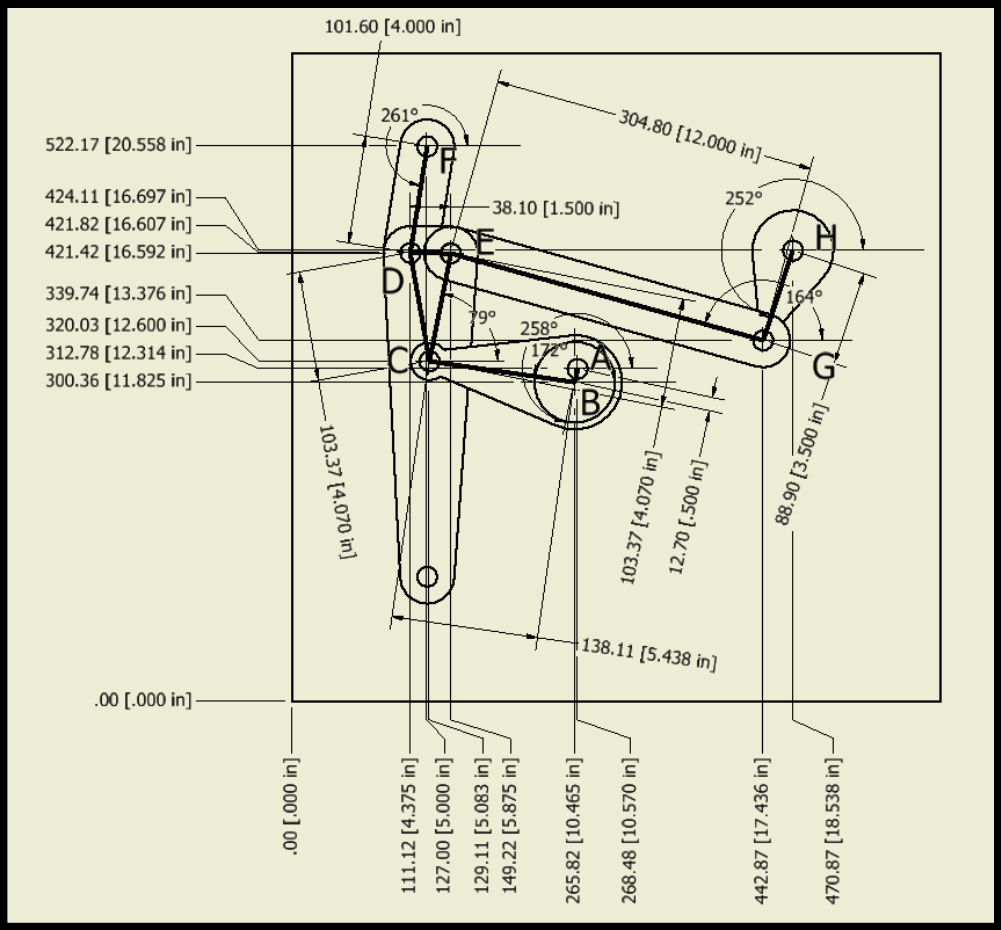
L'annexe C est le script Scilab du calcul Structomatique utilisé pour valider les approximations données dans l'exemple de CCC type A pour un véhicule. La version présentée à servi pour valider la courbe des valeurs de force max à la sortie. Il faut modifier cette version pour faire les autres vérifications. La courbe suivante est celle obtenue à partir du script.



Une fois modifié ce script donne la réaction à l'entrée (Bx) en x et y ainsi que la réaction à la sortie (Gx) en x et y.



L'image suivante donne les données initiales pour le script.



Script: DMC V4 CCC type A

```
//=====
// Copyright (C) 2018
// Université du quebec en Abitibi-Temiscamingue
// Patrick Bourgault
//
// Date of creation: 2018-01-20
// Modification: 2021-10-09
//=====
clear(); // Détruire toutes les variables et fonctions personnalisées
clc; // Effacer le contenu de la fenêtre «Command Window»
xdel(winsid()); // Fermer toutes les figures
mode(2);
format([8,1]);
//sda()
//=====

// ouverture des librairies dans le dossier actuel
fcndir = pwd()+"\routines scilab DMC\base"
getd(fcndir);
fcndir = pwd()+"\routines scilab DMC\structomat"
getd(fcndir);

function rad=deg2rad(deg)
    rad= 2*%pi*deg/360;
endfunction

function deg=rad2deg(rad)
    deg = 360*rad/(2*%pi);
endfunction

function radps=rpm2radps(rpm)
    radps = rpm*2*%pi/60;
endfunction

//initialisation des variables de contrôle
graph1_plot = 1;

//Données fournies
//=====
//coordonnée initiales approximative des pivots EN METRES
// coordonnée = [ position x , position y]
Ax=0.26848 //PIVOT MOTOÉLÉMENT
Ay=0.31278
Bx=0.26582 //PIVOT A TRIADE
By=0.30036
Cx=0.12911 //PIVOT D TRIADE
Cy=0.32003
Dx=0.11112 //PIVOT F TRIADE
Dy=0.42141
Ex=0.14922 //PIVOT E TRIADE
Ey=0.42142
Fx=0.12700 //PIVOT C TRIADE
Fy=0.52217
Gx=0.44287 //PIVOT B TRIADE
Gy=0.33974
Hx=0.47087 //PIVOT MOTORÉSISTANCE
```

```

Hy=0.42411

seg_ab=0.01270 //MOTOÉLÉMENT
seg_bc=0.13811 //TRIADE 1
seg_cd=0.10337 //TRIADE 4 SEG df
seg_ce=0.10337 //TRIADE 4 SEG de
seg_de=0.03810 //TRIADE 4 SEG ef
seg_df=0.10160 //TRIADE 3
seg_eg=0.30480 //TRIADE 2
seg_gh=0.08890 //MOTORESISTANCE

RPM=1000:500:6000;

for k=1:size(RPM,"c")
disp('iteration:'+string(k))
vit_ang=rpm2radps(RPM(k));

//ANGLE DE DÉPART
fi1=[deg2rad(258),vit_ang,0]; //MOTOÉLÉMENT
fi2=[deg2rad(172),0,0]; //TRIADE 1
fi3=[deg2rad(164),0,0]; //TRIADE 2
fi4=[deg2rad(261),0,0]; //TRIADE 3
fi5=[deg2rad(788),0,0]; //TRIADE 4
fi6=[deg2rad(252),0,0]; //MOTORÉSISTANCE

//Définir la masse de chacun des éléments du mécanisme
m1 =0; //MOTOÉLÉMENT
m2 =0; //TRIADE 1
m3 =0; //TRIADE 2
m4 =0; //TRIADE 3
m5 =500; //TRIADE 4 COEUR DE LA TRIADE
m6 =0; //MOTORESISTANCE

//-----MOTOÉLÉMENT-----
// Définir les paramètres cinématiques des points initiaux
// du MOTOÉLÉMENT segemnt AB

//construire les position du motoélément pour une rotation complete
nb_position=100;

//A 500rpm le couple est de 10Nm
coupleA=10;
//SUR LE PIVOT MOTEUR A

for i=1:nb_position+1
    fi1_ang(i)=deg2rad(267)+(i*2*pi/nb_position);

    ME_posx(i) = Ax+seg_ab*cos(fi1_ang(i));
    ME_posy(i) = Ay+seg_ab*sin(fi1_ang(i));

    ME_vitx(i) = 2*pi*seg_ab * vit_ang * (-sin(fi1_ang(i)));
    ME_vity(i) = 2*pi*seg_ab * vit_ang * (cos(fi1_ang(i)));

    ME_accx(i) = 2*pi*seg_ab*vit_ang^2*(-cos(fi1_ang(i)));
    ME_accy(i) = 2*pi*seg_ab*vit_ang^2*(-sin(fi1_ang(i)));

end

A = [Ax, Ay, 0, 0, 0, 0]; //pivot moteur
B = [ME_posx(1),ME_posy(1), ME_vitx(1),ME_vity(1),ME_accx(1),ME_accy(1)]; //pivot sortie

```

```

//construire les positions du motoélément
//Motorésistance bloquée
for i=1:nb_position+1
    MR_pos(2*i-1) = Gx;
    MR_pos(2*i) = Gy;
end

//-----TRIADE-----
// Définir les paramètres cinématiques des points initiaux
// de la TRIADE RR-RR-RR
// [A,B,C,fi1,fi2,fi3,fi4,ad,be,cf,de,df,ef]
B = [Bx, By, 0, 0, 0, 0];
C = [Cx, Cy, 0, 0, 0, 0];
D = [Dx, Dy, 0, 0, 0, 0];
E = [Ex, Ey, 0, 0, 0, 0];
F = [Fx, Fy, 0, 0, 0, 0];
G = [Gx, Gy, 0, 0, 0, 0];
H = [Hx, Hy, 0, 0, 0, 0];

//-----MOTORÉSISTANCE-----
// Définir les paramètres cinématiques des points initiaux
// de la MOTORÉSISTANCE segment GH
G = [Gx, Gy, 0, 0, 0, 0]; //pivot sortie
H = [Hx, Hy, 0, 0, 0, 0]; //pivot moteur

//=====

//calcul des moments d'inertie
//PAR RAPPORT AU PIVOT
IG1 =0; //MOTOELEMENT
IG2 =0; //TRIADE 1
IG3 =0; //TRIADE 2
IG4 =0; //TRIADE 3
IG5 =0.214; //TRIADE 4 COEUR DE LA TRIADE
IG6 =0; //MOTORESISTANCE

G1(1,:)=Rpoint(A,fi1,seg_ab/2);
G2(1,:)=Rpoint(B,fi2,seg_bc/2);
G3(1,:)=Rpoint(G,fi3,seg_eg/2);
G4(1,:)=Rpoint(F,fi4,seg_df/2);
G5(1,:)=Rpoint(C,fi5+%pi,seg_ce*3);
G6(1,:)=Rpoint(H,fi6,seg_gh/2);

Adata(1,:)=A;
Bdata(1,:)=B;
Cdata(1,:)=C;
Ddata(1,:)=D;
Edata(1,:)=E;
Fdata(1,:)=F;
Gdata(1,:)=G;
Hdata(1,:)=H;

//=====
//=====
// Simuler le mouvement du mécanisme avec une boucle FOR
for i = 1 : 1 : nb_position+1
    //disp('iteration:'+string(i))

    //Construire les données pour l'affichage
    datax=[A(1),B(1),B(1),C(1),C(1),D(1),C(1),E(1),D(1),E(1),D(1),F(1),E(1),G(1),G(1),H(1),C(1),G5(i,1)];
    datay=[A(2),B(2),B(2),C(2),C(2),D(2),C(2),E(2),D(2),E(2),D(2),F(2),E(2),G(2),G(2),H(2),C(2),G5(i,2)];

```

```

//AFFICHAGE DU MÉCANISME
// if graph1_plot
//   drawlater()
//   clf();
//   xsegs(datax,datay);
//   isoview="on";
//   drawnow();
// end

//CALCUL CINÉTIQUE
//voir page 343
//tri1pva(A,B,C,fi1,fi2,fi3,fi4,ad,be,cf,de,df,ef)
// A=[Apx Apy Avx Avy Aax Aay]
//fi2=[fi , ang_vit, ang_acc]
//seg_bc = long_seg
[fi2b,fi3b,fi4b,fi5b]=tri1pva(B,G,F,fi2,fi3,fi4,fi5,seg_bc,seg_eg,seg_df,seg_ce,seg_cd,seg_de);
//disp(fi2b);
//disp(fi3b);
//disp(fi4b);
//disp(fi5b);

fi1(1)=fi1_ang(i);
fi2=fi2b;
fi3=fi3b;
fi4=fi4b;
fi5=fi5b;
fi6=fi6;

fi2data(i,:)=fi2;
fi3data(i,:)=fi3;
fi4data(i,:)=fi4;
fi5data(i,:)=fi5;

A=A;
B=Rpoint(A,fi1,seg_ab);
C=Rpoint(B,fi2,seg_bc);
D=Rpoint(F,fi4,seg_df);
E=Rpoint(G,fi3,seg_eg);
F=F;
G=G;
H=H;

//RECALCUL DES CENTRES DE GRAVITÉ
G1(i+1,:)=Rpoint(A,fi1,seg_ab/2);
G2(i+1,:)=Rpoint(B,fi2,seg_bc/2);
G3(i+1,:)=Rpoint(G,fi3,seg_eg/2);
G4(i+1,:)=Rpoint(F,fi4,seg_df/2);
G5(i+1,:)=Rpoint(C,fi5+%pi,seg_ce*2);
G6(i+1,:)=Rpoint(H,fi6,seg_gh/2);

Adata(i,:)=A;
Bdata(i,:)=B;
Cdata(i,:)=C;
Ddata(i,:)=D;
Edata(i,:)=E;
Fdata(i,:)=F;
Gdata(i,:)=G;
Hdata(i,:)=H;

G1data(i,:)=G1(i,:);
G2data(i,:)=G2(i,:);

```

```

G3data(i,:)=G3(i,:);
G4data(i,:)=G4(i,:);
G5data(i,:)=G5(i,:);
G6data(i,:)=G6(i,:);

//Calcul des force en x et y
//Force du couple 10N
//F3(i,:)=reactions(5),reactions(6),0];
//F4(i,:)=reactions(5),reactions(6),0];
//F5(i,:)=reactions(5),reactions(6),0];

F_membrure(i)=1000/(cos(fi1(1)+%pi-fi2(1)));
F2x(i)=F_membrure(i)*sin(fi2(1)); //ok
F2y(i)=F_membrure(i)*cos(fi2(1)); //ok
// F2(i,:)=F2x(i),F2y(i),0];
F2(i,:)=F2x(i),F2y(i),0];
F3(i,:)=F3x(i),F3y(i),0];
F4(i,:)=F4x(i),F4y(i),0];
F5(i,:)=F5x(i),F5y(i),0];

//F=ma
F_m5x(i)=m5*G5(5);
F_m5y(i)=m5*G5(6);
F5(i,3)=IG5*fi5(3);

//voir page 343
//tri1rc(A,B,C,D,E,F,G1,G2,G3,G4,F1,F2,F3,F4)
// A=[Apx Apy Avx Avy Aax Aay]
// G1=[G1px G1py G1vx G1vy G1ax G1ay]
// F1=[F1Fx F1Fy F1M]
//reactions(i,:)= tri1rc(B,G,F,C,E,D,G2,G3,G4,G5,F2,F3,F4,F5);
R = tri1rc(B,G,F,C,E,D,G2(i,:),G3(i,:),G4(i,:),G5(i,:),F2(i,:),F3(i,:),F4(i,:),F5(i,:));
reactions(i,:)=R';

//equi_triade_x(i)= F_m5x(i)+reactions(7)+reactions(9)+reactions(11);
//equi_triade_y(i)= F_m5y(i)+reactions(8)+reactions(10)+reactions(12);

equi_triade_x(i)= F_m5x(i)+reactions(7)+reactions(9)+reactions(11);
equi_triade_y(i)= F_m5y(i)+reactions(8)+reactions(10)+reactions(12);
end //fin du for i boucle principe
//=====
//=====
fi1_ang = rad2deg(fi1_ang);
//figure
//subplot(7,2,1)
//plot(fi1_ang,F2x)
//ylabel("F2x");
//subplot(7,2,2)
//plot(fi1_ang,F2y)
//ylabel("F2y");
//subplot(7,2,3)
//plot(fi1_ang,reactions(:,1))
//ylabel("Bx");
//subplot(7,2,4)
//plot(fi1_ang,reactions(:,2))
//ylabel("By");
//subplot(7,2,5)
//plot(fi1_ang,reactions(:,3))
//ylabel("Gx");

```



```

//subplot(7,2,6)
//plot(fi1_ang,reactions(:,4))
//ylabel("Gy");
//subplot(7,2,7)
//plot(fi1_ang,reactions(:,5))
//ylabel("Fx");
//subplot(7,2,8)
//plot(fi1_ang,reactions(:,6))
//ylabel("Fy");
//subplot(7,2,9)
//plot(fi1_ang,reactions(:,7))
//ylabel("Cx");
//subplot(7,2,10)
//plot(fi1_ang,reactions(:,8))
//ylabel("Cy");
//subplot(7,2,11)
//plot(fi1_ang,reactions(:,9))
//ylabel("Ex");
//subplot(7,2,12)
//plot(fi1_ang,reactions(:,10))
//ylabel("Ey");
//subplot(7,2,13)
//plot(fi1_ang,reactions(:,11))
//ylabel("Dx");
//subplot(7,2,14)
//plot(fi1_ang,reactions(:,12))
//ylabel("Dy");

//figure
//subplot(3,2,1)
//plot(fi1_ang,F2x)
//ylabel("F2x");
//subplot(3,2,2)
//plot(fi1_ang,F2y)
//ylabel("F2y");
//subplot(3,2,3)
//plot(fi1_ang,reactions(:,1))
//ylabel("Bx");
//subplot(3,2,4)
//plot(fi1_ang,reactions(:,2))
//ylabel("By");
//subplot(3,2,5)
//plot(fi1_ang,reactions(:,3))
//ylabel("Gx");
//subplot(3,2,6)
//plot(fi1_ang,reactions(:,4))
//ylabel("Gy");

forcemax(k)=max(reactions(:,3))

end//end for k

plot(RPM,forcemax)

```