

NOTE TECHNIQUE

NODELEP SAS

Document Type	RAPPORT DE SYNTHÈSE <i>(VERSION PROVISOIRE)</i>		
Project	NODELEP - NO19APH		
Document Title	Actionnement d'un cœur artificiel – Développement des briques technologiques de l'actionneur piézo-hydraulique APZH CONFIDENTIEL		
<u>Project Reference :</u> NO19APH	<u>Document Reference :</u> NT_NODELEP_NO19APH_20200925	<u>Issue :</u> 01	<u>Date :</u> 25/09/2020

<u>Subject</u>	Le présent document décrit la technologie d'actionnement développé par NODELEP SAS, en collaboration avec les entreprises BNCE / NOVATEM, en vue de la réalisation d'un système de commande distante d'un ventricule artificiel pulsatile.
----------------	--

Validation	Société	Nom	Fonction	Date	Signature
<i>Written by :</i>	NODELEP	Prof. Bertrand NOGAREDE	Expert scientifique	25/09/2020	
<i>Written by :</i>	NOVATEM	Martin CRONEL	Ingénieur	25/09/2020	MC
<i>Approved by:</i>	BNCE	Prof. Bertrand NOGAREDE	Président	25/09/2020	
<i>Authorized by :</i>	BNCE	BNCE	Présidente de NODELEP	25/09/2020	

<u>Diffusion</u>	
Association ADICARE	Marie Hélène BAYER
APHP Pitié-Salpêtrière	Prof. Pascal LEPRINCE

- Sommaire -

1. INFORMATIONS GENERALES.....	4
1.1. OBJECTIVE OF THE DOCUMENT.....	4
1.2. APPLICABLE DOCUMENTS	4
1.3. REFERENCE DOCUMENTS	4
1.4. ABBREVIATIONS	4
2. STRUCTURE D’ACTIONNEMENT PRECONISE	5
2.1. PRINCIPE GENERAL DU SYSTEME NODELEP	5
2.2. LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES PRECONISEES	5
2.3. AVANTAGES DE LA SOLUTION RETENUE	5
3. ELEMENTS DE CONCEPTION DE LA TECHNOLOGIE DEVELOPEE.....	7
3.1. ARCHITECTURE GENERALE DE L’ACTIONNEUR PIEZO-HYDRAULIQUE.....	7
3.2. LE MOTEUR PIÉZOÉLECTRIQUE	8
3.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	8
3.4. ELEMENTS DE DIMENSIONNEMENT DE L’ACTIONNEUR APZH.....	9
3.5. STRATEGIE DE COMMANDE RAPPROCHEE DU PIEZOMOTEUR	10
3.6. LE ROTO-TRANSLATEUR A BILLES.....	10
3.7. LE CORPS VOLUMETRIQUE CYLINDRIQUE A SOUFFLET.....	11
3.8. L’ELECTRONIQUE D’ALIMENTATION ET DE COMMANDE	11
4. REALISATION DU PROTOTYPE D’ACTIONNEUR PIEZOHYDRAULIQUE APZH.....	13
5. DÉVELOPPEMENT DE L’ELECTRONIQUE D’ALIMENTATION ET DE COMMANDE PARAMETRABLE	15
5.1. ÉTUDE CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT	15
5.2. IMPLÉMENTATION DE LA CARTE DE PILOTAGE MOTEUR	18
5.3. TESTS DE VALIDATION DE LA CARTE DE PILOTAGE MOTEUR.....	20
5.4. REGULATION.....	23
5.5. ESSAIS EXPERIMENTAUX.....	26
5.6. ÉLECTRONIQUE ET LOGICIEL DE COMMANDE	26
5.7. SYNTHÈSE ÉLECTRONIQUE.....	28
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	29
7. ANNEXES.....	30
7.1. ANNEXE A :	30
7.2. ANNEXE B :	31
7.3. ANNEXE C.....	31

1. INFORMATIONS GENERALES

1.1. OBJECTIVE OF THE DOCUMENT

Dans le cadre d'une opération subventionnée par l'Association ADICARE au titre de l'année 2019, la société NODELEP, en partenariat avec le Prof. Pascal LEPRINCE, a développé une étude de faisabilité portant sur un dispositif d'actionnement déporté permettant la commande à distance d'un ventricule artificiel pulsatile. A cette fin, les équipes de BNCE SAS et NOVATEM SAS, partenaires de NODELEP spécialisés dans la conception, le développement et l'expérimentation de systèmes mécatroniques innovants, ont été sollicitées par NODELEP afin d'étudier la faisabilité d'un système d'actionnement électro-hydraulique distant. Ce document présente une synthèse des activités réalisées sur le sujet depuis le lancement de l'opération jusqu'à ce jour.

1.2. APPLICABLE DOCUMENTS

Item	Title	Reference	Issue	Origin
[AD1]				
[AD2]				

1.3. REFERENCE DOCUMENTS

Item	Title	Reference	Issue	Origin
[RD1]				
[RD2]				

1.4. ABBREVIATIONS

2. STRUCTURE D’ACTIONNEMENT PRECONISE

2.1. PRINCIPE GENERAL DU SYSTEME NODELEP

La société NODELEP est à l’origine d’un nouveau concept de pompe cardiaque consistant en l’activation électrique à distance d’un ventricule à double chambre (air / sang) à débit pulsé. Ce ventricule est en tous points comparable, dans sa constitution générale, au ventricule à commande pneumatique développé par E. JARVIK dans les années 1980.

Dans le cas du concept développé par NODELEP, l’air comprimé est remplacé par un liquide supposé incompressible (par exemple de l’eau ou une solution physiologique) activant la membrane de commande. Selon un procédé dérivé des systèmes maître-récepteur classiquement utilisés dans les dispositifs mécano-hydrauliques (commandes de freins...), le fluide de commande est mis en pression au moyen d’un organe de pompage primaire déporté (non implantable), commandé électriquement dans le cas présent selon un cycle reproduisant le besoin fonctionnel (diastole – systole).

L’asservissement en temps réel du système est donc réalisé en contrôlant conjointement la quantité de fluide injectée à tout instant dans la chambre de commande et sa pression.

2.2. LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES PRECONISEES

Tirant directement parti de la technologie développée par BNCE / NOVATEM en matière d’actionnement piézo-hydraulique (applications spatiales), la pompe primaire repose sur la l’association d’un moteur piézoélectrique rotatif à ondes progressives et d’un réducteur à vis à bille permettant de comprimer une chambre cylindrique à soufflet. Cette chambre maître est reliée au moyen d’un conduit d’interconnexion à la chambre de commande du ventricule cardiaque.

Résultant d’une longue expérience de conception et d’expérimentation au sein de BNCE / NOVATEM s’agissant de cette technologie alternative, le choix du moteur piézoélectrique se justifie par ses avantages en termes de couple massique (près de 10 fois supérieur à celui d’un moteur à effet électromagnétique dans la gamme de taille centimétrique considérée), ainsi que pour sa discrétion acoustique. Le réducteur à vis à bille offre quant à lui la possibilité d’opérer la transformation roto-translative du mouvement en mettant en jeu un minimum de frottements.

2.3. AVANTAGES DE LA SOLUTION RETENUE

Comparé aux fonctionnalités offertes par les ventricules à commande pneumatique, les avantages de la solution mise en avant par NODELEP, sur la base des technologies maîtrisées et développées par BNCE / NOVATEM, tiennent principalement à :

- Une forte compacité du système de commande (externalisé selon les objectifs actuels, mais potentiellement miniaturisable en vue d’être implantable) ;

NODELEP 01 25/09/2020	NODELEP Erreur ! Source du renvoi introuvable.	 
-----------------------------	--	--

- La mise en jeu de vitesses internes très faibles (le moteur piézoélectrique délivre un couple élevé à très basse vitesse) assurant, de part les caractéristiques propres du piézomoteur et du réducteur à bille, une grande discrétion de fonctionnement (bruits inaudibles, vibrations réduites et ultrasonores) ;

- Une commandabilité accrue et souple résultant conjointement de la précision de positionnement micrométrique du moteur piézoélectrique à ondes progressives et de la stratégie d'asservissement préconisée fondée sur l'exploitation fin du signal de pression dans la chambre primaire (possibilité d'assister de manière active et contrôlée la décharge du ventricule).

3. ELEMENTS DE CONCEPTION DE LA TECHNOLOGIE DEVELOPPEE

3.1. ARCHITECTURE GENERALE DE L'ACTIONNEUR PIEZO-HYDRAULIQUE

L'architecture générale de l'actionneur piézo-hydraulique - APZH proposé par BNCE est schématisée sur la Figure 1.

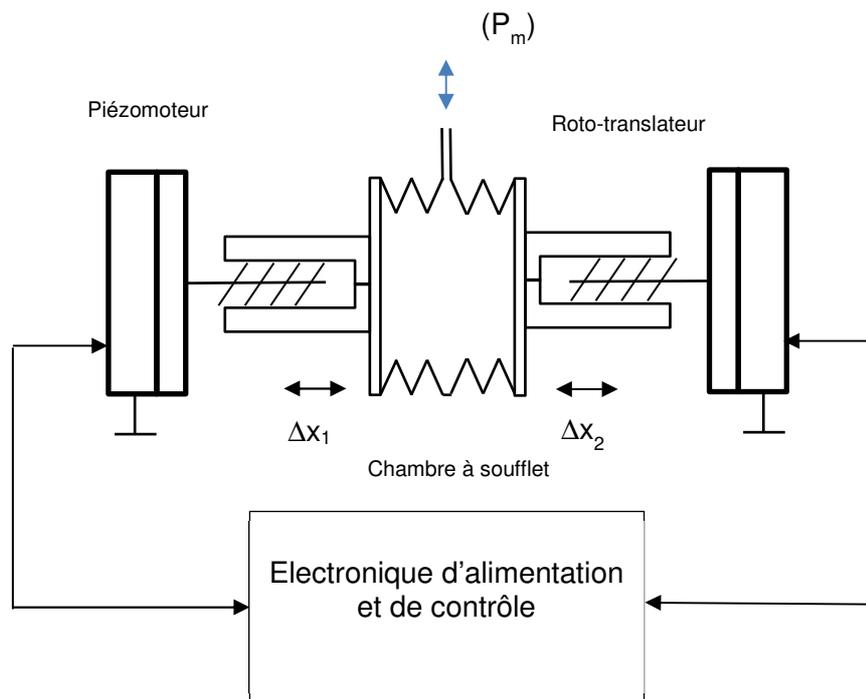


Figure 1 : Architecture générale du concept d'actionneur piézo-hydraulique APZH développé par BNCE / NOVATEM

La structure retenue repose sur la déformation d'une chambre à soufflet élastomère au moyen de 2 actionneurs linéaires coaxiaux. La chambre éjecte et aspire périodiquement le fluide transmetteur permettant la commande déportée du ventricule artificiel.

L'architecture à double actionnement permet d'optimiser le dimensionnement des moteurs tout en offrant des fonctionnalités sécuritaires en termes de disponibilité du système (fonctionnement possible en mode de défaut à l'aide d'un seul moteur).

La compression de la chambre à soufflet est réalisée au moyen de 2 actionneurs linéaires tête-bêche. Ces actionneurs sont constitués chacun d'un piézomoteur rotatif à onde progressive entraînant un roto-translateur à haut rendement. Ce dernier repose sur la mise en œuvre d'une vis à bille à grand pas.

3.2. LE MOTEUR PIÉZOÉLECTRIQUE

Le moteur conçu et réalisé en vue de satisfaire aux exigences du concept d'assistance mis en avant par NODELEP résulte directement des travaux menés dans le domaine depuis près de 20 ans par les ingénieurs et chercheurs de BNCE / NOVATEM.

L'architecture de moteur retenue correspond à celle du moteur annulaire à ondes progressives mis au point par SASHIDA à la fin des années 1980 [Le moteur piézoélectrique, B. NOGAREDE, Techniques de l'Ingénieur, D3765]. Une exemple de ce type de moteur est illustré sur la Figure 2.



Figure 2 : Exemple de moteur piézoélectrique à onde progressive (Shinsei USR60)

3.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe général de fonctionnement du moteur piézoélectrique annulaire repose sur l'exploitation d'une onde progressive excitée au niveau d'un résonateur mécanique accolé à un élément céramique piézoélectrique sectorisé, alimenté sous haute tension par un système diphasé de tensions sinusoïdales à haute fréquence (de l'ordre de 40 KHz).

Le stator annulaire est excité au voisinage d'une de ses fréquences de résonance (mode de flexion) en vue d'obtenir une déformée sinusoïdale.

Pour créer l'onde progressive, il faut superposer 2 ondes stationnaires déphasées excitées en quadrature de phase. Le mouvement particulière généré à la surface du stator sous l'effet de la propagation de l'onde de flexion correspond à une trajectoire elliptique. Ce mouvement vibratoire surfacique est alors à même de transmettre par frottement une vitesse moyenne au rotor maintenu au contact de la structure vibrante.

Le calibrage du couple disponible est déterminé par la compression d'un élément élastique préchargé.

Comme l'illustre la Figure 3, le mouvement particulière elliptique induit un entraînement du rotor dans le sens contraire à celui de l'onde.

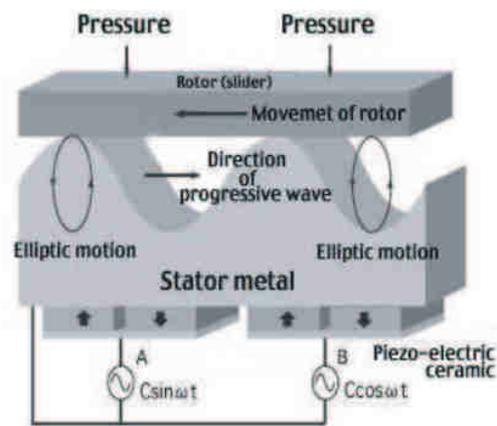


Figure 3 : Principe d'entraînement du moteur piézoélectrique

3.4. ELEMENTS DE DIMENSIONNEMENT DE L'ACTIONNEUR APZH

Le dimensionnement général de l'actionneur résulte d'un processus d'optimisation visant à optimiser les performances volumiques et énergétiques de l'actionneur sous les critères et contraintes propres aux technologies retenues. Sans rentrer dans le détail des calculs détaillés effectués, les éléments de dimensionnement principaux se déduisent des équations simplifiées rassemblées ci-après.

Le volume éjecté par la chambre sous l'effet d'un déplacement Δx d'un des plateaux de compression est donné par :

$$\Delta V = \frac{\pi D^2}{2} \Delta x$$

où D désigne le diamètre de référence de la chambre cylindrique.

Le travail mécanique s'écrit :

$$\Gamma_m \delta \theta = \frac{\pi D^2}{4} P_m \delta x$$

où P_m désigne la pression hydrostatique dans la chambre et Γ_m le couple développé par le moteur. p désignant le pas de vis du roto-translateur, on a de plus :

$$\frac{\delta x}{\delta \theta} = \frac{p}{2\pi}$$

d'où :

$$p = \frac{8\Gamma_m}{D^2 P_m}$$

Par ailleurs, T désignant la période d'activation du système, la vitesse de rotation Ω du moteur est donnée par :

$$\Omega = \frac{\Delta x}{\pi p T}$$

Le choix d'un diamètre de référence de la chambre $D = 80$ mm, pour un volume maximal chassé de 100 cm^3 , donne une course maximum $\Delta x = 10$ mm. Le couple disponible de référence des moteurs étant fixé à $0,5 \text{ N.m}$, la production d'une pression de commande maximale de 180 mm.Hg , soit 24.10^3 Pa environ, conduit à choisir un pas de vis $p = 26$ mm.

Dans ces conditions, pour une fréquence de commande $f=1 \text{ Hz}$ ($T=1\text{s}$), la fréquence de rotation maximale des moteurs vaut $\Omega = 0,122 \text{ rad.s}^{-1}$, soit 46 tr.min^{-1} , tandis que la force de poussée développée par le roto-translateur vaut $F_m = 120 \text{ N}$. Ces caractéristiques sont compatibles avec les choix technologiques retenus pour les moteurs et les roto-translateurs développés par BNCE / NOVATEM.

3.5. STRATEGIE DE COMMANDE RAPPROCHEE DU PIEZOMOTEUR

Conformément à la stratégie de commande la plus communément utilisée [Le moteur piézoélectrique, Prof. B. NOGAREDE, Techniques de l'Ingénieur, D3765], le réglage de la vitesse du moteur développé par BNCE / NOVATEM repose sur le contrôle de la fréquence d'excitation du mode de flexion, l'écart entre la fréquence propre et la fréquence d'excitation permettant indirectement de régler l'amplitude de l'onde progressive, et par voie de conséquence la vitesse communiquée au rotor (l'excursion en fréquence est à peine de qq KHz).

3.6. LE ROTO-TRANSLATEUR A BILLES

La fonction réalisée par le roto-translateur développé consiste à transformer le mouvement de rotation primaire produit par le piézomoteur en un mouvement de translation alternatif. Parmi les caractéristiques spécifiques du composant recherché, on peut retenir :

- Un pas de vis relativement élevé (26 mm) ;
- Un jeu axial très faible (inférieur à $100 \mu\text{m}$) afin d'éviter tout bruit ou vibration sous l'effet de l'inversion périodique du sens de déplacement ;
- Une rendement énergétique élevé ($> 98 \%$) afin de minimiser la consommation globale de l'actionneur ;
- Un encombrement axial réduit (< 40 mm).

La technologie retenue repose sur la mise en œuvre d'une vis à recirculation de bille (3 circuits).

Les caractéristiques du roto-translateur développé sont rassemblées dans le Tableau 1.

Diamètre externe de la vis (mm)	12.5
Diamètre de fond de filet (mm)	10.6
Diamètre de bille (mm)	2.0
Pas de vis (mm)	25.4
Diamètre corps extérieur (mm)	26 (g6)
Longueur totale corps extérieur (mm)	32
Force axiale dynamique maximale (N)	2300
Jeu axial maximal (mm)	0.050

Tableau 1 : Caractéristiques principales du roto-translateur développé

3.7. LE CORPS VOLUMETRIQUE CYLINDRIQUE A SOUFFLET

Compte tenu des déformations requises (de l'ordre de 100 %) et des pressions mises en jeu (< 100kPa) , la chambre à soufflet est constituée d'un corps élastomère (NBR ou EPDM) moulé. Néanmoins, la technologie des soufflets métalliques à membranes soudées est potentiellement exploitables, en vue de bénéficier de pertes volumétriques latérales minimales et d'une énergie de déformation réduite. Au stade du démonstrateur actuel, la solution à soufflet élastomère se justifie pleinement du fait de son meilleur compromis performances / coût / facilité de fabrication sur mesure.

3.8. L'ELECTRONIQUE D'ALIMENTATION ET DE COMMANDE

La carte électronique développée par BNCE / NOVATEM en vue d'accéder aux fonctionnalités requises par la commande de la pompe NODELEP permet la génération de ces signaux sinusoïdaux avec une compacité et une robustesse adaptée aux contraintes propres au domaine du cœur artificiel.

Outre la compacité de ce type d'ensemble mécatronique, l'exploitation est relativement silencieuse, faisant ainsi envisager un système d'actionnement complet embarquable et léger qui représente potentiellement une amélioration de la qualité de vie des patients par rapport aux solutions pneumatiques existantes.

Les investigations réalisées jusqu'à présent ont donc été orientées sur les aspects suivants :

- La conception d'un système de génération des signaux de commande, puissance et contrôle, à caractère paramétrable de par sa vocation expérimentale ;
- Le développement et la mise en place des transformateurs planaires assurant une compacité accrue pour un poids minimisé ;
- Le routage et la fabrication d'un prototype de validation des lois de pilotage moteur ;
- Les essais de validation de la carte de pilotage prototype ;

NODELEP 01 25/09/2020	NODELEP Erreur ! Source du renvoi introuvable.	 
-----------------------------	--	--

- Le développement de fonctions électroniques et d'un logiciel de supervision embarqué permettant la communication avec un système extérieur ; cette solution confère à l'électronique réalisée une versatilité relativement évoluée permettant notamment un paramétrage aisé des fonctions réalisées lors des tests in vitro à venir.

Ces développements ont été intégré dans une maquette de preuve de concept d'actionnement à forte densité de puissance silencieux. La preuve de concept vise à dimensionner les fonctions électroniques de génération des signaux de commande et de puissance ainsi qu'à l'instrumentation de l'ensemble.

4. REALISATION DU PROTOTYPE D'ACTIONNEUR PIEZOHYDRAULIQUE APZH

Au stade de la preuve de concept, la validation du comportement et des performances du système peut être testée sur un demi-actionneur (un seul plateau de poussée est mobile). La constitution d'un actionneur complet pourra être effectuée ultérieurement en greffant sur le prototype initial un deuxième ensemble piézomoteur – rototranslateur.

Les briques technologiques réalisées en vue de la constitution de la preuve de concept sont illustrées dans les Figures 4 à 6.

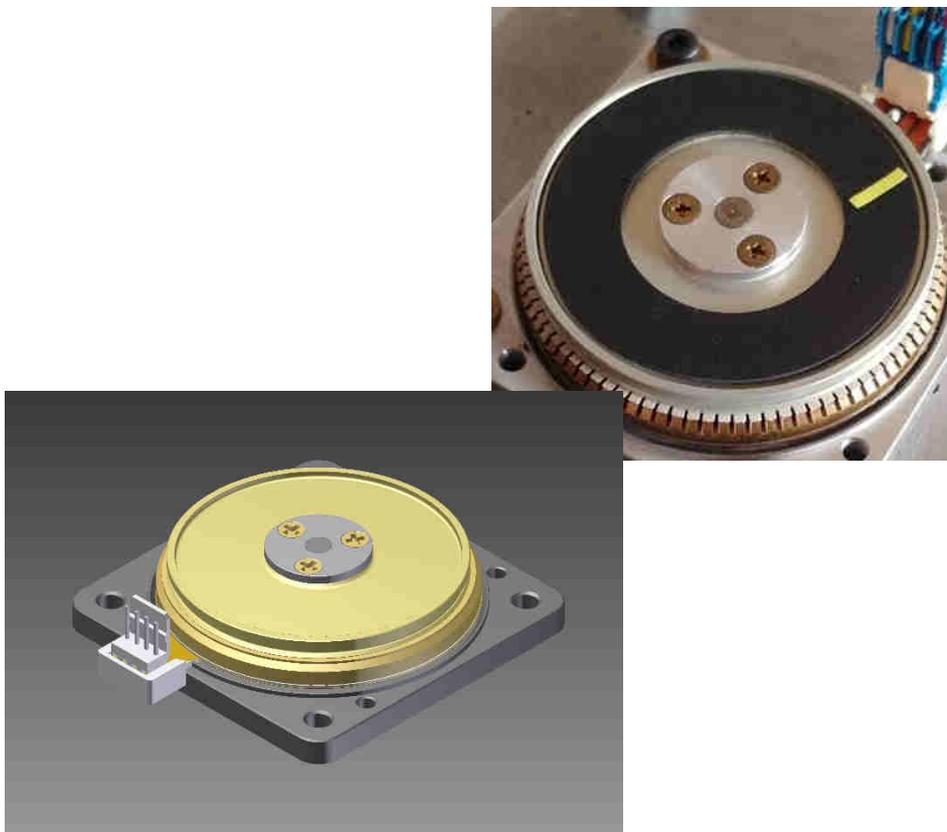


Figure 4 : Vue du piézomoteur développé ($\Gamma=0,8$ N.m à $N=120$ tr.min⁻¹)



Figure 5 : Roto-translateur à bille



Figure 6 : Prototype de chambre à soufflet élastomère réalisée

5. DÉVELOPPEMENT DE L'ELECTRONIQUE D'ALIMENTATION ET DE COMMANDE PARAMETRABLE

5.1. ÉTUDE CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT

L'électronique de la carte est conçue de telle manière à fournir une tension sinusoïdale en sortie alimentant le moteur piézoélectrique à l'aide d'une tension continue en entrée.

La carte analogique est divisée en 3 parties :

- Une partie commande permettant de réaliser les signaux d'entrée pour une partie puissance
- Une partie puissance l'électronique permettant d'alimenter le moteur en lui fournissant une tension sinusoïdale. ([Voir vue externe Annexe B](#))
- Une régulation qui contient un système de stabilisation par régulation fréquentielle, qui permet de maintenir le moteur à sa fréquence de résonance et servant d'entrée à la partie commande.

5.1.1. Partie commande

La partie commande est composée d'un oscillateur contrôlé en tension (VCO) permettant de générer 4 fois la fréquence consigne ($4 \cdot 40 \text{ KHz} = 160 \text{ KHz}$), cette dernière est associée à un compteur divisant la fréquence par 4, et un multiplexeur permettant de constituer les signaux de commande des 4 groupes de transistors NPN et PNP, afin qu'ils commandent les MOSFET. L'association d'un compteur et d'un multiplexeur permet de créer deux signaux avec un rapport cyclique de 0.25.

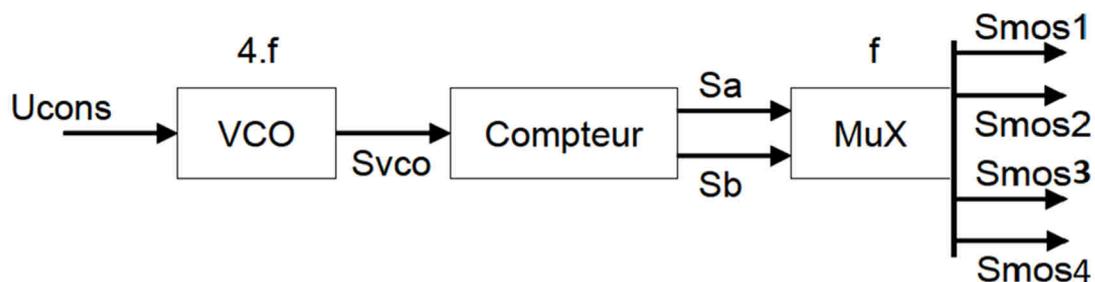


Figure 1 : Système de la partie commande

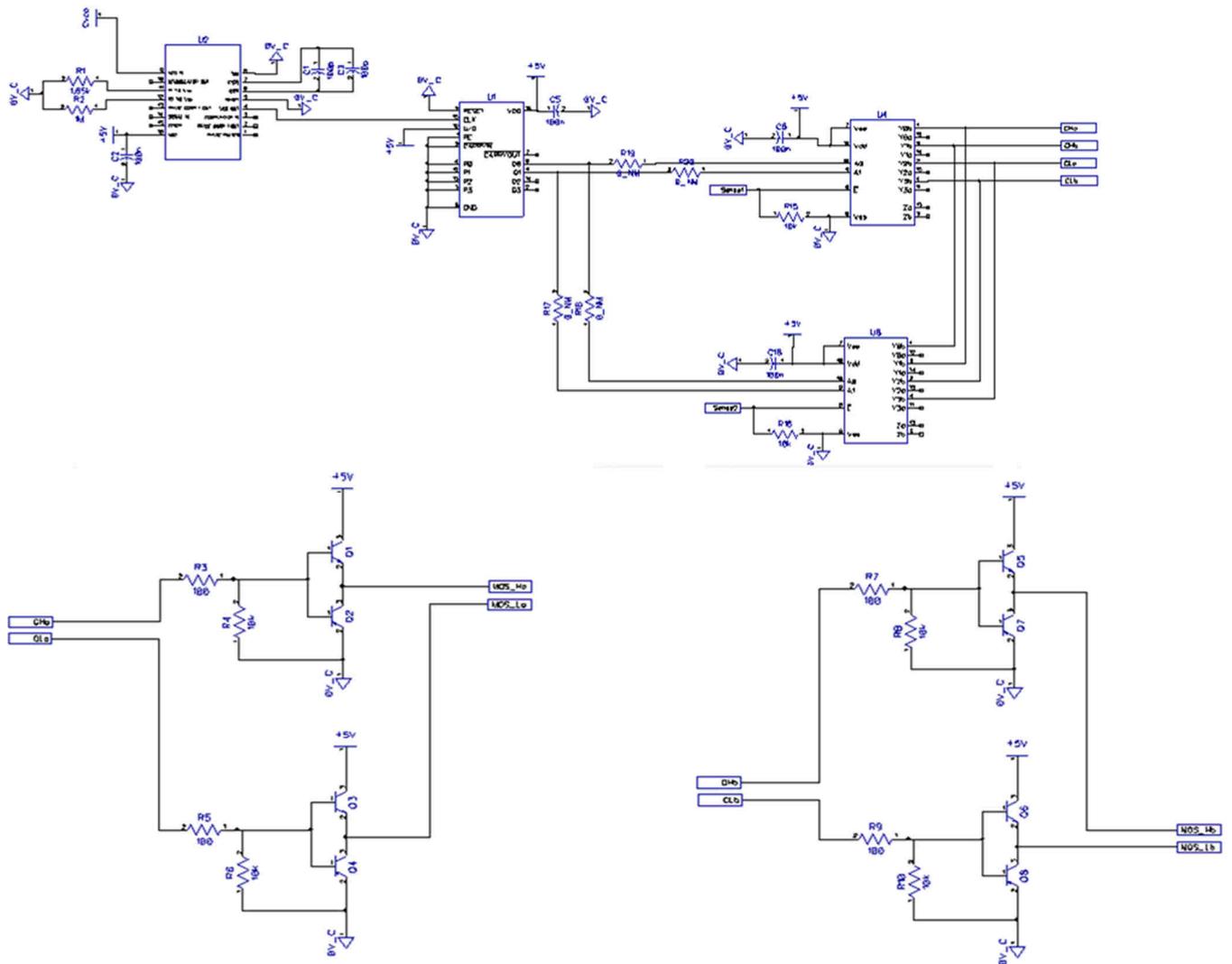


Figure 2 : Schématique de la partie commande

5.1.2. Partie puissance

La partie puissance est un onduleur demi-pont de type push-pull parallèle, contenant les interrupteurs suivis d'un transformateur élévateur et d'un filtre de sortie. Les interrupteurs utilisés sont des MOSFET. Les filtres en sortie sont composés d'une inductance et d'une capacité.

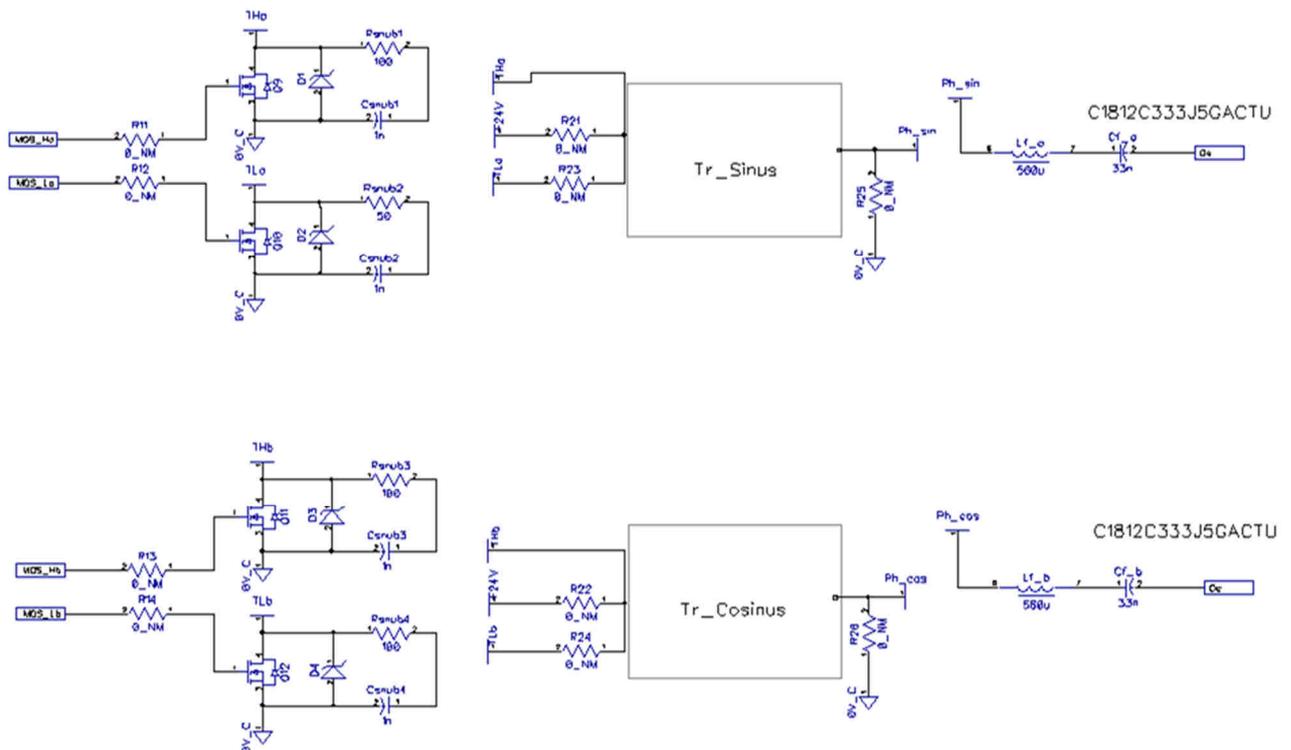


Figure 3 : Schématique de la partie puissance

5.1.3. Partie régulation

La partie régulation se fait ici de manière fréquentielle, le but étant de stabiliser le moteur à sa fréquence de résonance grâce à la mesure de son amplitude vibratoire. Cette amplitude sera mesurée grâce à un jeu d'électrode en céramique. Si l'amplitude vibratoire est maximale alors le moteur fonctionne à sa fréquence résonance.

L'amplitude de cette onde est une réaction de la fréquence d'excitation des céramiques :

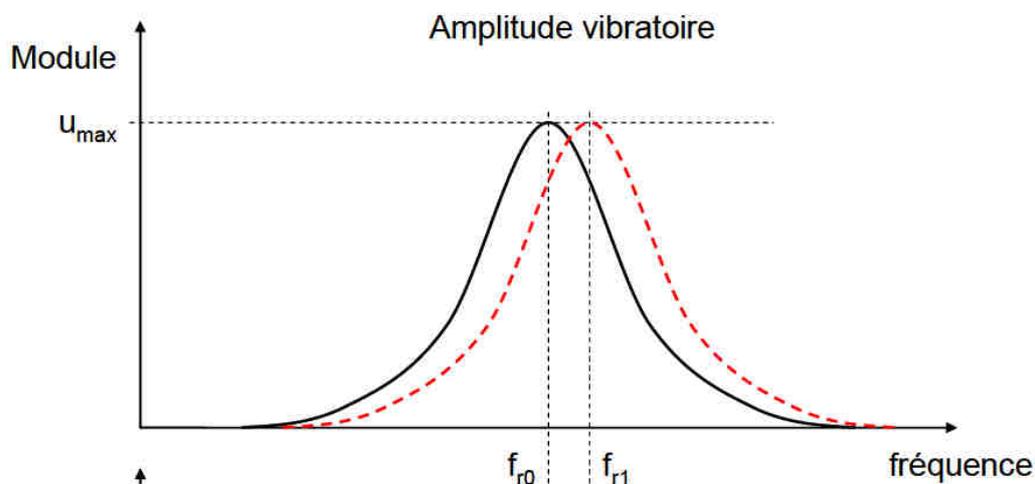


Figure 4 Graphe amplitude vibratoire VS fréquence d'excitation [R2]

On remarque ici plusieurs choses :
L'amplitude est maximale autour d'une fréquence de résonance

La fréquence de résonance varie en fonction de la perturbation (fr_0 à vide, fr_1 en charge)

La forme gaussienne implique que les points de fonctionnement stables sont ceux situés aux fréquences supérieures à la fréquence de résonance.

La mesure de l'amplitude vibratoire utilise la tension issue des céramiques auxiliaires. Cette tension est transformée en une tension continue par un détecteur de valeur crête à crête.

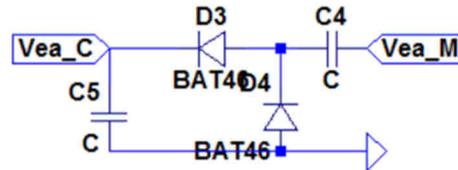


Figure 5 : Détecteur de valeur crête à crête

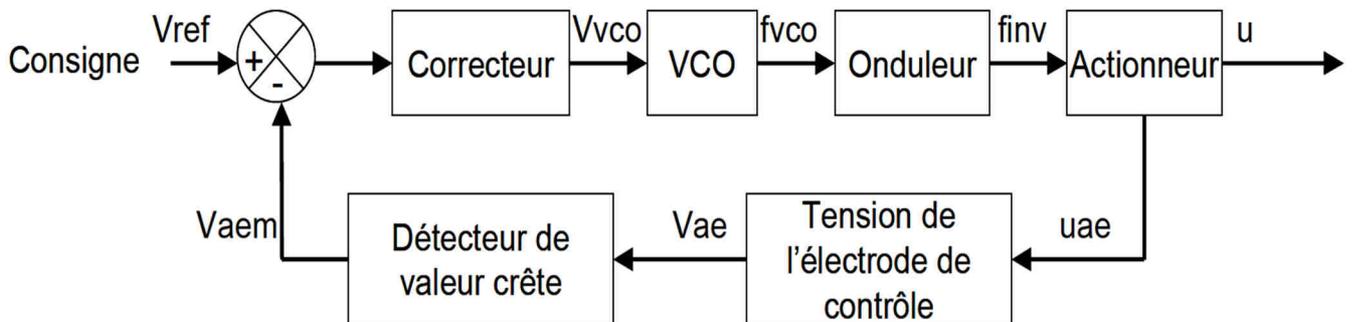


Figure 6 : Asservissement du système

5.2. IMPLÉMENTATION DE LA CARTE DE PILOTAGE MOTEUR

La carte analogique est constituée de la partie commande et la partie puissance, elle est connectée à la carte analogique qui contient la régulation.

5.2.1. Placement des différentes fonctions

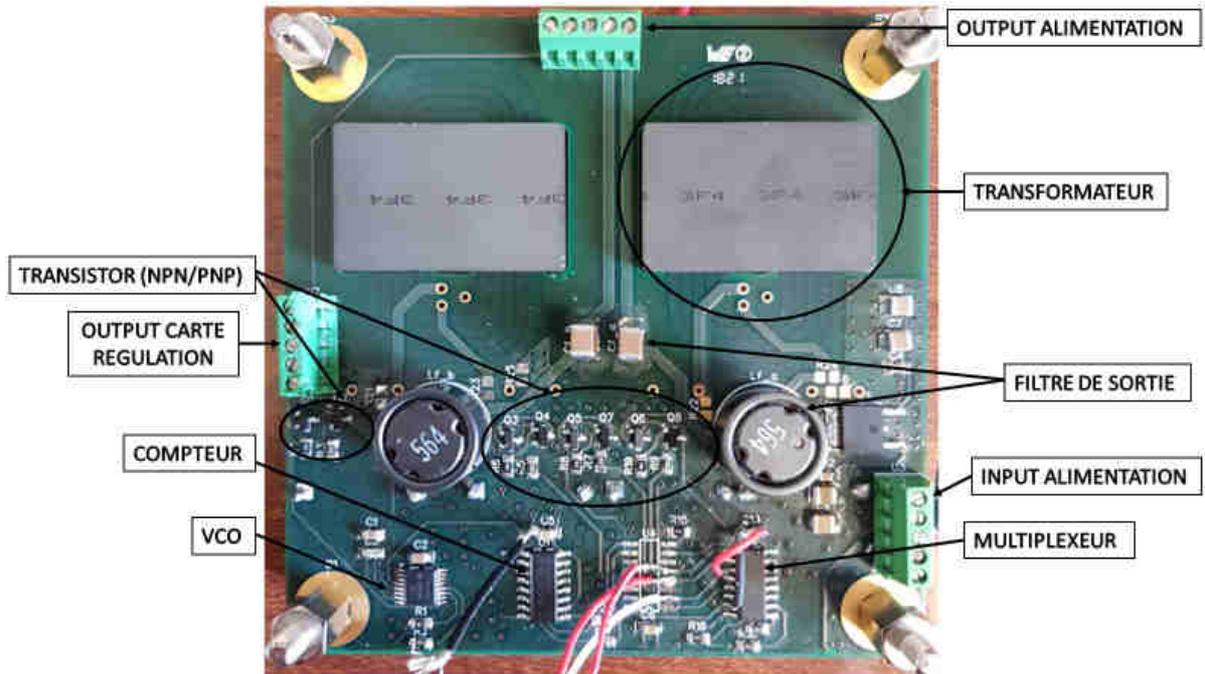


Figure 7 : Face avant de la carte

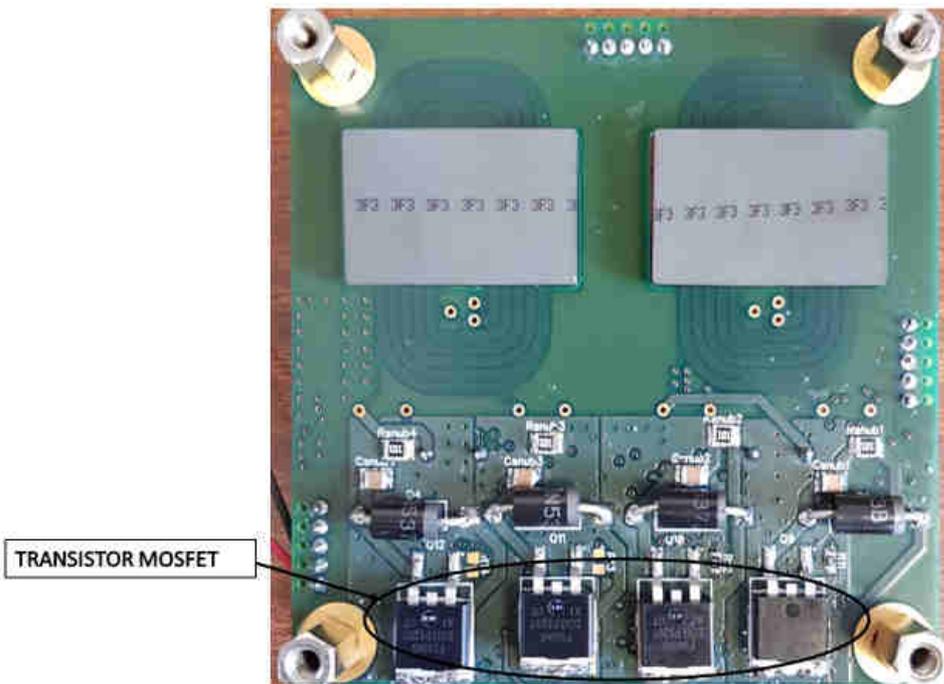


Figure 8 : Face arrière de la carte

5.3. TESTS DE VALIDATION DE LA CARTE DE PILOTAGE MOTEUR

5.3.1. Test sortie VCO

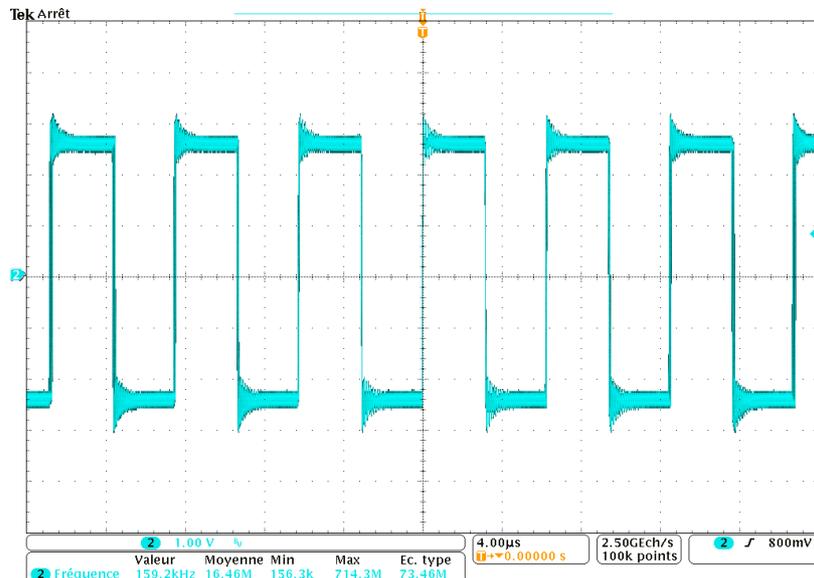


Figure 9 : Signal à la sortie du VCO

On observe un signal carré d'une fréquence de 159.2 KHz soit environ 4 fois la fréquence de résonance du moteur. Le VCO assure son rôle et génère bien 4 fois la consigne.

5.3.2. Test sortie compteur

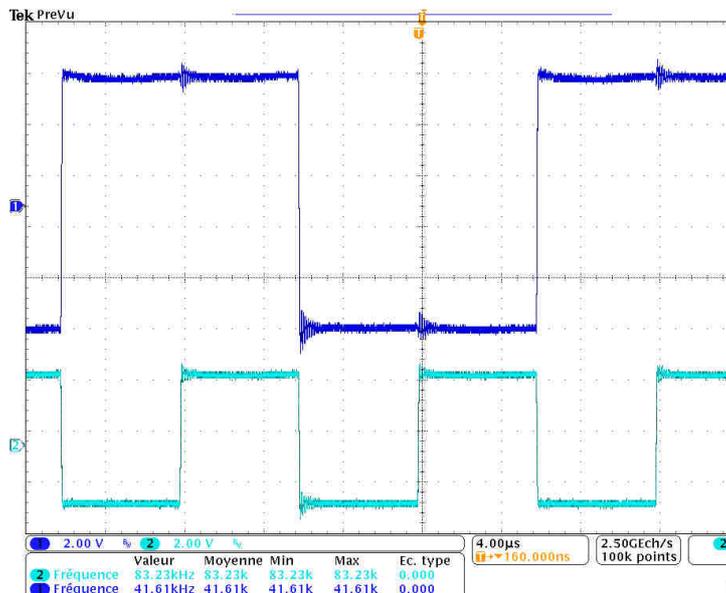


Figure 10 : Signaux à la sortie du COMPTEUR

Voie 1 : Signal carré d'une fréquence de 80 KHz, soit l'horloge dont se sert le multiplexeur.

Voie 2 : Signal carré d'une fréquence de 40 KHz, soit la fréquence de résonance du moteur.

5.3.3. Test sortie multiplexeur

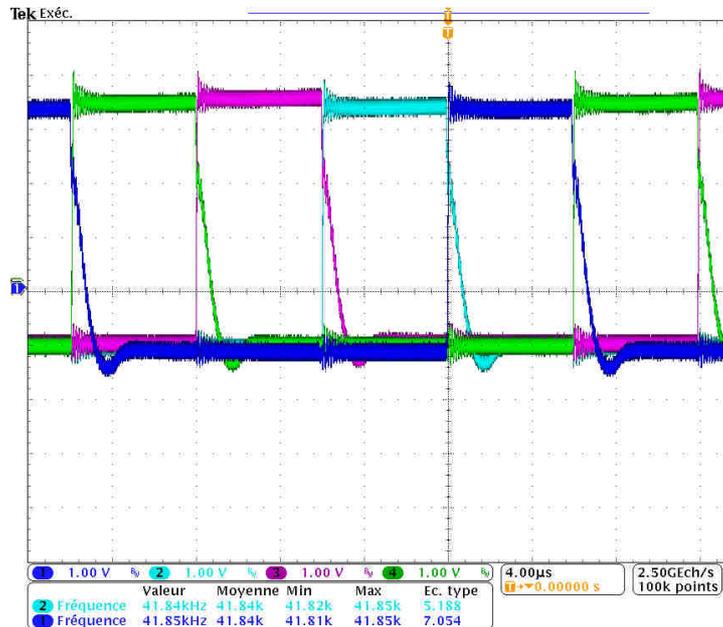


Figure 11 : Signaux à la sortie du MULTIPLEXEUR

On obtient le signal consigne d'environ 40 KHz démultiplexé en 4 afin de les distribuer au 4 MOSFET.

5.3.4. Test sortie transistor npn/npn

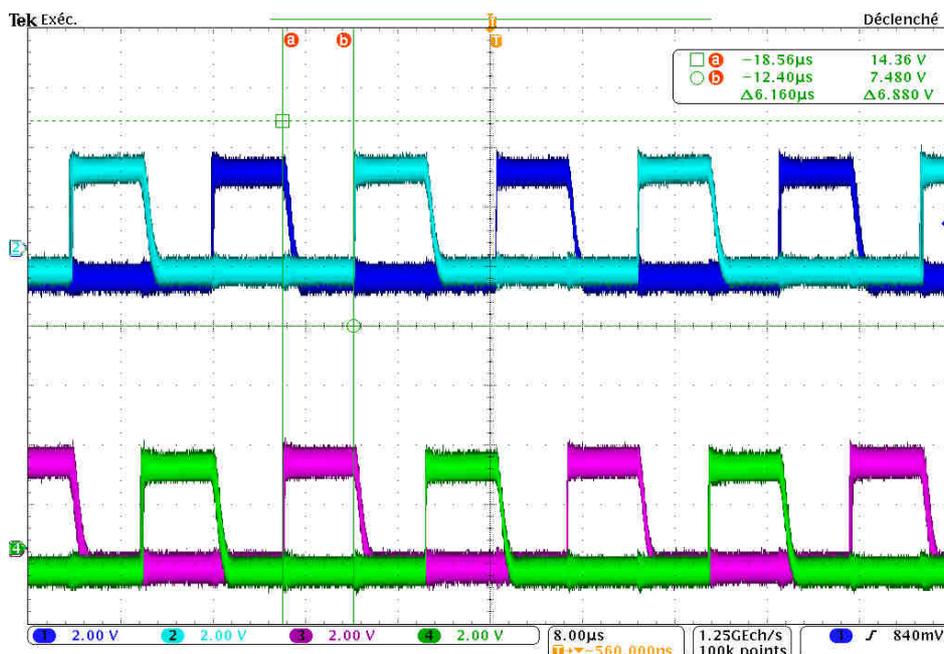


Figure 12 : Signaux à la sortie des transistor NPN/PNP

Voie 1 et 2 : Signaux en opposition de phase avec un rapport cyclique de 0.25.
Voie 3 et 4 : Signaux en opposition de phase avec un rapport cyclique de 0.25.

5.3.5. Test de la sortie des transistors MOSFET

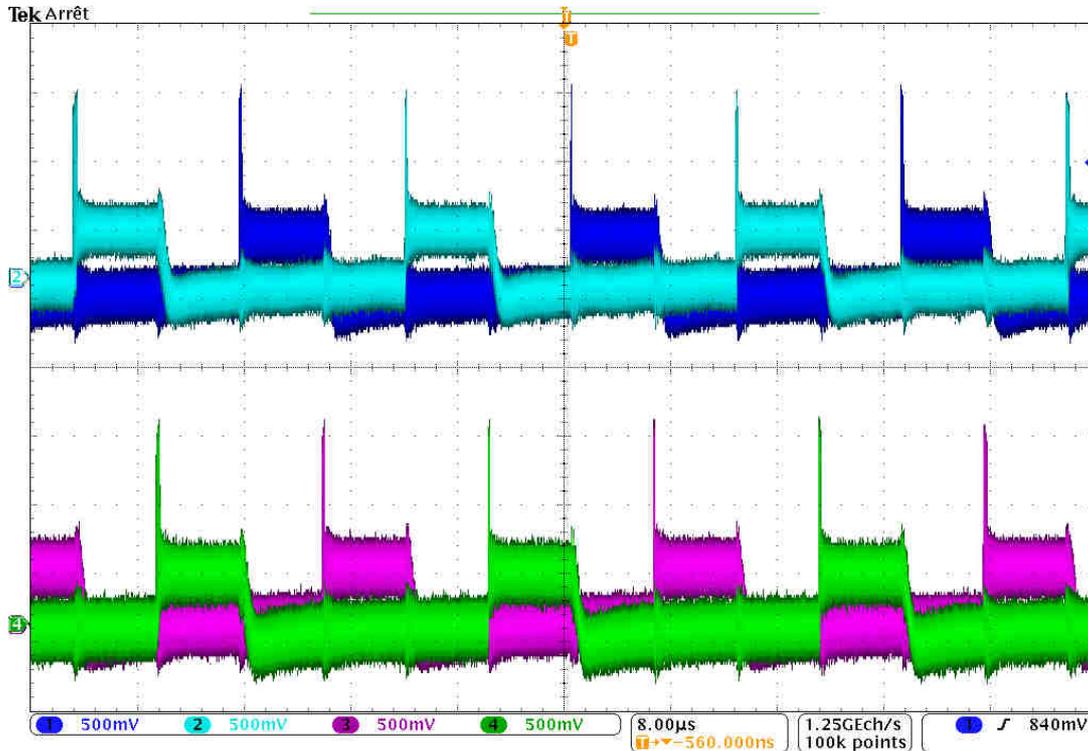


Figure 13 : Signaux à la sortie des transistors MOSFET

5.4. REGULATION

5.4.1. Architecture

Une fois que la chaîne directe est modélisée, on s'aperçoit que pour commander l'amplitude vibratoire du moteur, il faut réguler la tension de la céramique témoin.

Le système peut être schématisé comme ci-dessous :

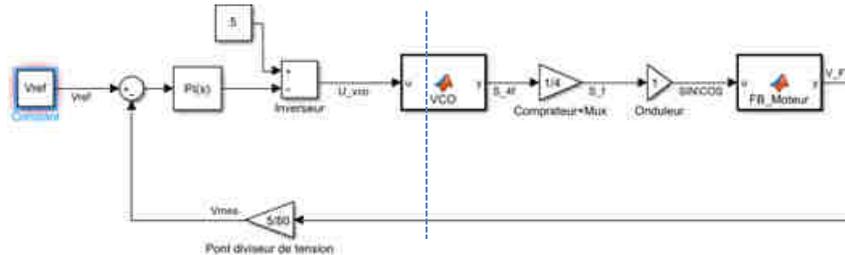


Figure 14 Schéma bloc de la boucle d'asservissement de la tension céramique témoin

Le circuit de régulation est représenté à gauche du schéma ci-dessus.

Étant donné que les composants électroniques traiteront des signaux d'amplitude 5V, un pont diviseur de tension réduira la tension de feedback V_{FB} à une échelle de [0-5V].

Le correcteur PI reçoit l'écart entre l'image de cette tension V_{FB} et une tension référence, et commande le VCO en fréquence.

On inclut un inverseur qui vient compenser la logique inverse de la relation « Amplitude vibratoire – Fréquence d'excitation des céramiques ». La valeur 5 est du fait que le VCO accepte une valeur de tension entre 0 et 5.

5.4.2. Conception électronique

L'architecture retenue pour la phase de prototypage est la suivante :

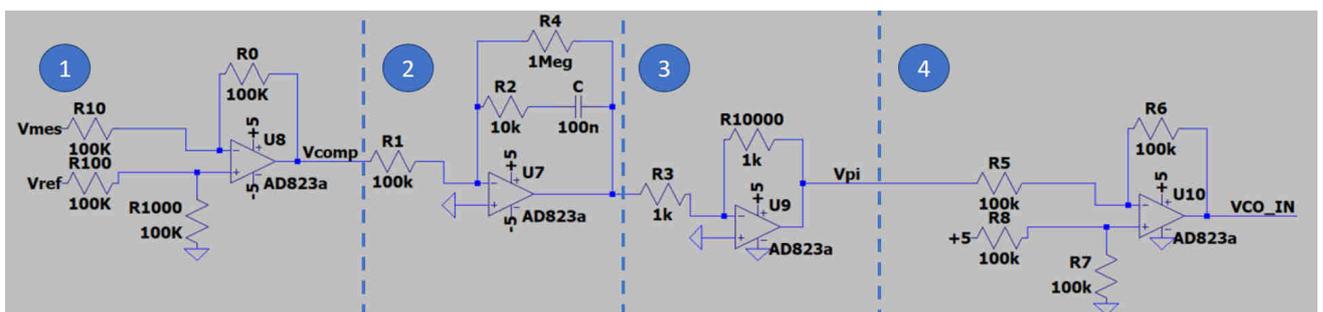


Figure 15 Circuits électroniques extraits de la simulation LTSpice

Montage 1 :

Un comparateur à gain unitaire permettant de sortir une tension entre +5V et -5V.

Montage 2 :

Un Montage PI dont la fonction de transfert est :

$$F(p) = -\frac{R_2 C \cdot p + 1}{R_1 C p}$$

En identifiant avec la fonction canonique d'un régulateur PI à deux coefficients (K_p , K_i) :

$$F(p) = K_p + K_i \cdot p = \frac{K_p / K_i \cdot p + 1}{1 / K_i \cdot p}$$

On retrouve les relations suivantes :

$$\begin{cases} K_i = \frac{1}{R_1 C} \\ K_p = \frac{R_2}{R_1} \end{cases}$$

**La résistance R_4 de $1M\Omega$ permet de décharger le condensateur C .*

Montage 3 :

Pour compenser le signe négatif de la fonction de transfert du montage PI, un montage inverseur de signe a été ajouté dans le circuit.

Montage 4 :

Pour compenser la logique inverse de la chaîne directe, un inverseur de niveau a été mis en place : $V_{COin} = 5 - V_{pi}$.

Montage 5 : (non illustré dans la Figure 15)

Un pont diviseur de tension permettant d'adapter le niveau de tension de retour céramique témoin à une échelle [0 – 5V].

5.4.3. Mise au point

Une fois le circuit mis en place, il ne manque plus qu'à bien régler le correcteur PI et le range de fréquence du VCO.

- Réglage du VCO :

Le range de fréquence du VCO doit être bien choisi pour ne pas avoir de zone instable (inférieur à la fréquence de résonance) et pas de zone morte (très supérieur à la fréquence de résonance).

Il faut aussi prendre en compte la variation de la fréquence de résonance quand le moteur est en charge :

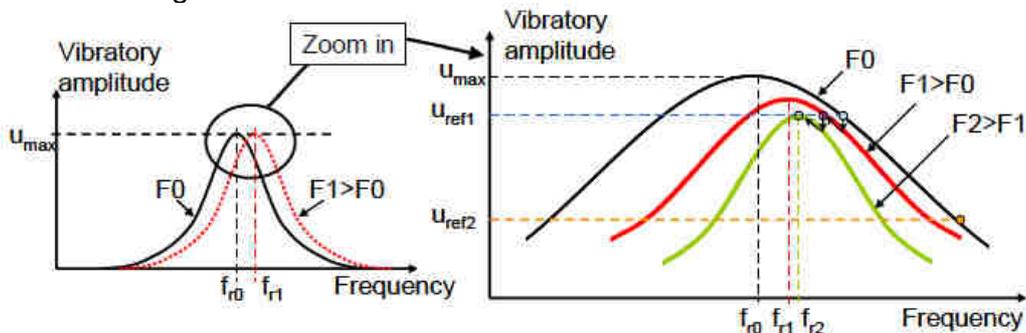


Figure 16 Comportement de l'amplitude vibratoire en fonction d'un effort [R2]

Étant donné que le moteur actuel possède une fréquence de résonance à 40 kHz à vide, il a été choisi de régler la fréquence minimale à 42kHz pour ne pas aller dans les grandes vitesses et ne pas accélérer le vieillissement des céramiques. À cette fréquence et à vide, le moteur tourne dans les 50tr/min.

Il a aussi été choisi de mettre la fréquence maximale à 45 kHz pour garantir une vitesse quasi nulle.

Avec des résistances standards, il est difficile de régler le VCO avec précision. Sur le premier prototype, il n'a pas été prévu de mettre des résistances en séries. Une extension de la carte a donc été ajoutée pour ajouter cette possibilité :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = 27k\Omega + 2.7k\Omega \\ R_2 = 200k\Omega \\ C = 200pF \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} f_{min} \approx 42 \text{ kHz} \\ f_{max} \approx 45.5 \text{ kHz} \end{array} \right.$$

NB : les fréquences citées ici sont les fréquences d'alimentations ; c'est-à-dire en entrée du moteur.

- Réglage du correcteur PI :

Le système a été modélisé dans Matlab/Simulink :

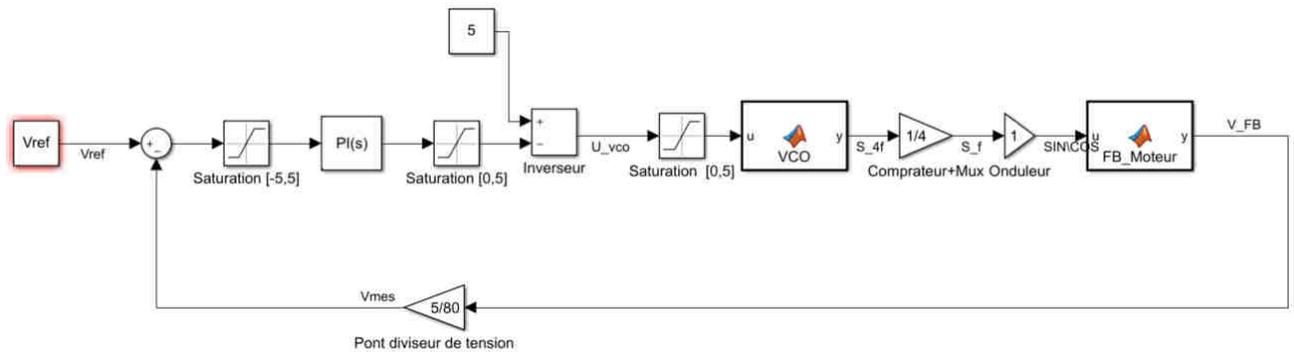


Figure 17 Schéma bloc Simulink incluant les saturations électroniques

La synthèse du correcteur a été facilement gérée par l'outil automatique « PID auto-tune », inclus dans la librairie « system identification » de Matlab, pour un temps de réponse inférieur à 40ms :

$$\begin{cases} K_p = 0.1 \\ K_i = 10 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} R_1 = 100k\Omega \\ R_2 = 10k\Omega \\ C = 1\mu F \end{cases}$$

- Réglage de l'échelle de la consigne :

Étant donné que le VCO limite la commande à une fréquence d'excitation à un intervalle $[f_{min}, f_{max}]$, l'intervalle de tension FeedBack est donc limité aussi. Selon la caractérisation menée, la tension V_FB aura comme valeur maximale 34V (équivalente à $f_{min} = 42kHz$). Cela a pour conséquence que le système ne peut pas répondre à une consigne $V_{ref} > 2.125V$.

Pour profiter de tout l'intervalle $[0,5V]$ de la consigne, il faudrait réadapter le pont diviseur pour avoir un retour de 5V à 34V de V_FB. Le gain deviendrait donc « 5/34 ».

5.5. ESSAIS EXPERIMENTAUX

Les essais ont montré un bon comportement de l'électronique de régulation. Néanmoins, l'électronique de puissance (onduleurs Push-Pull) montre une haute consommation, comparée par exemple à une électronique de type Shinsei, qui se répercute à une hausse en température dans les transformateurs planaires et les MOSFETs. Ces élévations de température sont probablement dues aux difficultés de réglage des résistances sur la carte prototype et constituent un axe d'amélioration pour des évolutions futures de ce concept.

5.6. ÉLECTRONIQUE ET LOGICIEL DE COMMANDE

Une troisième partie d'électronique a été développée dont le but est d'assurer l'interface entre la régulation en fréquence et le système extérieur (pour le moment l'ordinateur du banc de test). Les principales fonctionnalités sont la remontée d'information sur l'angle du moteur et la consommation de l'ensemble, et, dans l'autre sens, la traduction des ordres du banc pour obtenir l'angle de sortie ou la vitesse de référence désirée.

Le logiciel est basé sur l'utilisation des outils de MICROCHIP, afin de fonctionner sur un processeur résistant aux radiations, le pic16f76.

L'architecture électronique est basée sur l'utilisation de SPI, un protocole de communication entre composants principalement placé sur une même carte électronique. La philosophie de cette architecture est présentée sur la Figure 18.

Le but de cet électronique et plus précisément du programme inclus dans le microcontrôleur, est de fournir une interface de communication comprenant toutes informations nécessaires au monitoring de l'état de l'ensemble mécatronique. Ces informations pourront servir à un système plus haut niveau pour modifier le comportement de l'actionneur lors de phase particulière de l'exploitation comme la chirurgie, la convalescence, la maintenance ou encore la recharge.

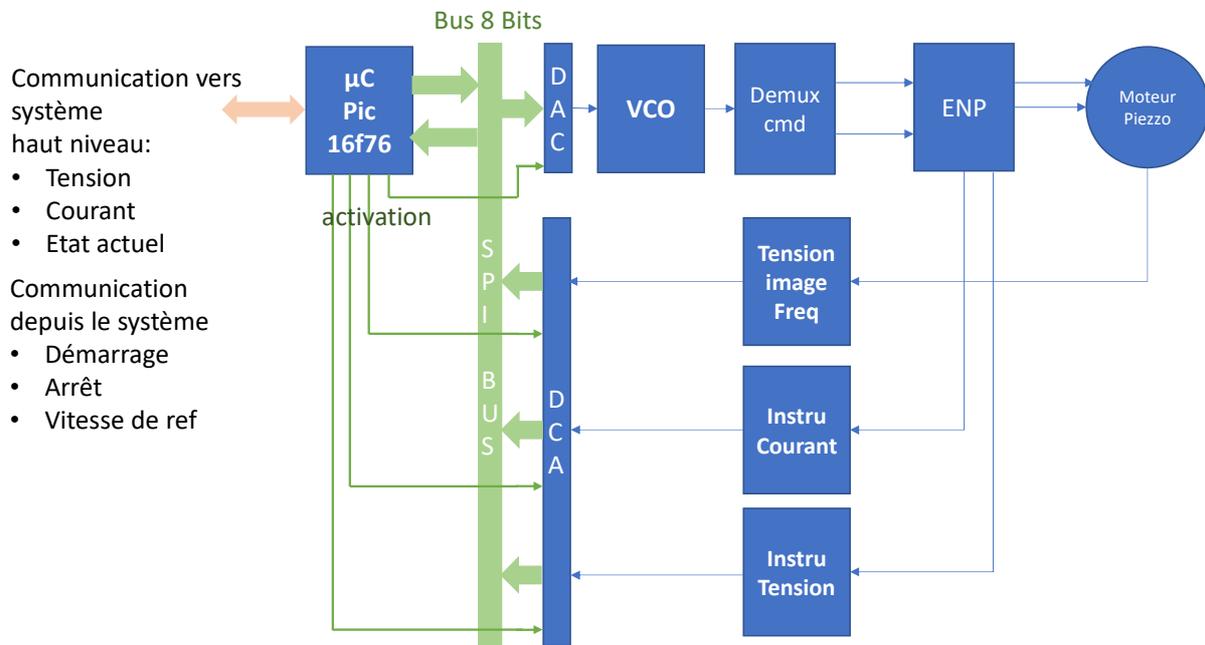


Figure 18 Architecture électronique carte sur table

5.7. SYNTHÈSE ÉLECTRONIQUE

Une carte de pilotage spécifiquement dédié au piézomoteur mis en œuvre dans le concept d'actionneur APZH a été réalisée. La première phase de ce développement a permis de dérisquer les fonctions principales de l'actionnement et de valider plusieurs aspects :

- Les fonctions de la partie commande, via la mise au point d'une régulation analogique d'un générateur de fréquence VCO ;
- Les fonctions des parties puissance ont confirmé le bon fonctionnement des ponts « push-pull » ;
- Les transformateurs planaires, finalement validés par la mise au point des autres composants de la carte ;
- Une base de système communiquant pour intégrer à l'avenir les fonctions de monitoring et d'interface avec un système médical plus haut niveau.

Quelques photos de la maquette sont disponibles en Annexe C

Les résultats préliminaires sont encourageants, notamment en termes de compacité atteignable. Les différents prototypes réalisés n'ont pas été réalisés dans un facteur de forme définitif pour des raisons d'instrumentation, mais BNCE / NOVATEM est confiante dans la possibilité de miniaturisations des fonctions électroniques.

Cette maquette servira de base technique pour le développement d'une seconde maquette, plus intégré qui permettra d'effectuer des tests sur la longévité de l'ensemble mécatronique, qui permettront de caractériser le vieillissement du moteur et l'impact du vieillissement sur les performances de l'ensemble.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux réalisés ont porté sur l'étude de faisabilité d'un nouveau concept d'actionneur piézo-hydraulique – APZH permettant l'activation à distance d'un ventricule artificiel à commande fluide. Le concept d'actionneur mis en avant par NODELEP vise à combiner une transmission hydraulique de la commande du ventricule avec un actionneur électrique primaire (chargé de la mise en pression de ce fluide de commande) doté de performances et de fonctionnalités inédites. A cette fin, NODELEP s'est rapproché des sociétés partenaires, BNCE SAS et NOVATEM SAS, possédant une longue expérience de la conception et de la fabrication des moteurs piézoélectriques, des dispositifs d'interface mécanique associés et des moyens de pilotage électroniques dédiés à ces nouvelles technologies d'actionneur.

Comparé aux fonctionnalités offertes par les ventricules à commande pneumatique, les avantages de la solution promue par NODELEP, à partir des technologies maîtrisées et développées par BNCE / NOVATEM, tiennent principalement à :

- Une forte compacité du système de commande (externalisé selon les objectifs actuels, mais potentiellement miniaturisable en vue d'être implantable) ;
- La mise en jeu de vitesses internes très faibles (le moteur piézoélectrique délivre un couple élevé à très basse vitesse) assurant, de par les caractéristiques propres du piézomoteur, une grande discrétion de fonctionnement (bruits inaudibles, vibrations réduites et ultrasonores) ;
- Une commandabilité accrue et souple résultant conjointement de la précision de positionnement micrométrique du moteur piézoélectrique à ondes progressives et de la stratégie d'asservissement préconisée fondée sur l'exploitation fine du signal de pression dans la chambre primaire (possibilité d'assister de manière active et contrôlée la décharge du ventricule).

L'étude de faisabilité commandée par NODELEP a permis, d'une part, de définir et spécifier les briques technologiques nécessaires à la constitution de l'actionneur de commande (piézomoteur, système de transformation roto-translatrice à haut rendement, électronique d'alimentation et de commande) et d'autre part de fabriquer les composants spécifiques permettant la réalisation d'un premier démonstrateur (preuve de concept). Ainsi, au stade actuel, NODELEP dispose d'un prototype de piézomoteur à onde progressive opérationnel, d'un roto-translateur spécifiquement conçu permettant la compression d'une chambre primaire éjectant le fluide de commande, d'un module électronique d'alimentation et de commande spécifique dont la particularité tient aux possibilités de paramétrage de ses fonctionnalités (versatilité) en vue des tests in vitro à venir. Ces briques technologiques, conçues et fabriquées par BNCE / NOVATEM, ont été testées avec succès durant l'été 2020. Il s'agit maintenant de les intégrer au sein d'une preuve de concept opérationnelle. Ces travaux doivent être menés à bien d'ici la fin du premier semestre de 2021.

La première étape de ce projet a donc été déterminante pour la suite du projet, en ce sens qu'elle a permis de valider l'ensemble des briques technologiques du concept de pompe silencieuse et compacte recherchée par NODELEP.

Les prochaines étapes ciblées sont :

- Tests du démonstrateur complet et réglages fins (février 2021) ;
- Essais in vitro sur le banc de l'APHP durant le premier semestre de 2021 ;
- Etudes d'optimisation technologique du concept en vue d'une industrialisation potentielle, réalisation d'un démonstrateur optimisé.

7. ANNEXES

7.1. ANNEXE A :

Fréquence d'alimentation	40 [kHz]
Tension d'alimentation	120 [Vrms]
Couple maximum en régime continu	0.5 [Nm]
Puissance maximale en régime continu	5 [W]
Vitesse à puissance max. en régime continu	100 [rpm]
Couple maximum	~ 1 [Nm]
Sens de rotation	CW, CCW
Duré de vie	~ 1000 [Heures]
Températures de fonctionnement	-10 [°C] à +50 [°C]
Température maximale	55 [°C] à la surface du boîtier
Masse	275 [g]

Figure 19 : Caractéristiques du piézomoteur développé



Figure 21 : Prototype du piézomoteur développé

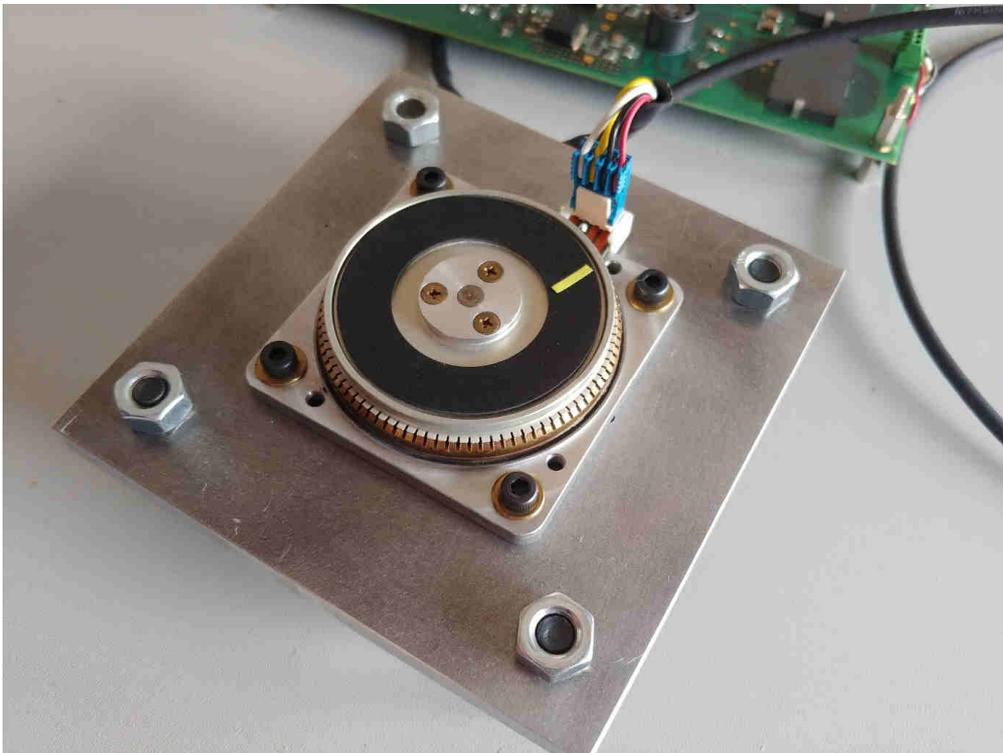


Figure 22 - Prototype du piézomoteur sur platine d'essai

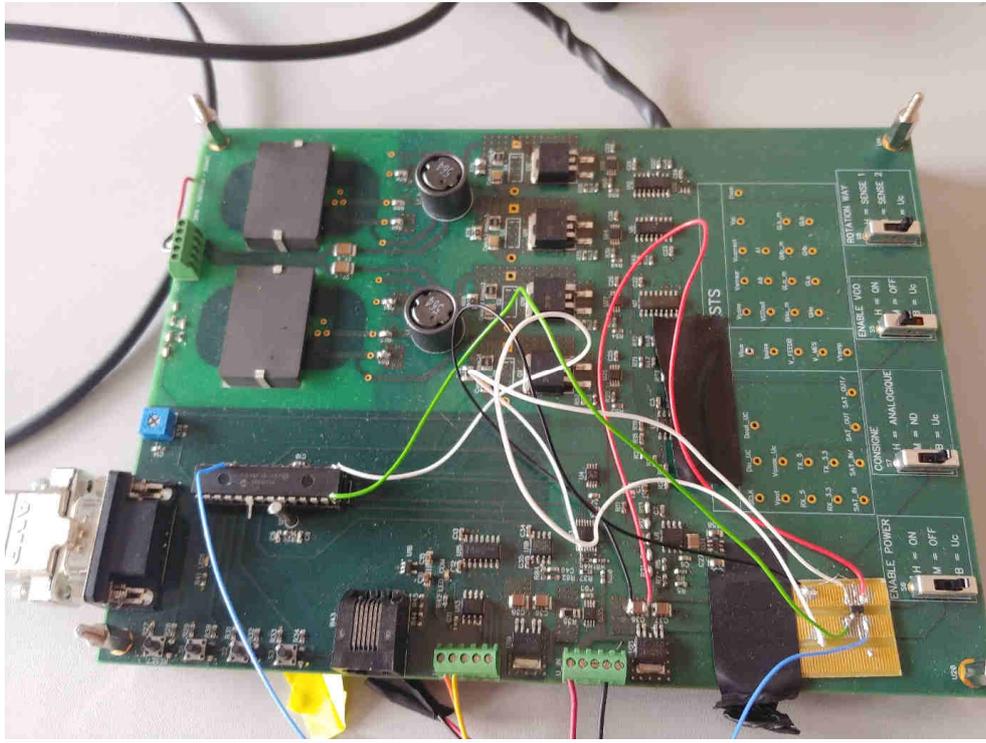


Figure 23 : Carte de puissance

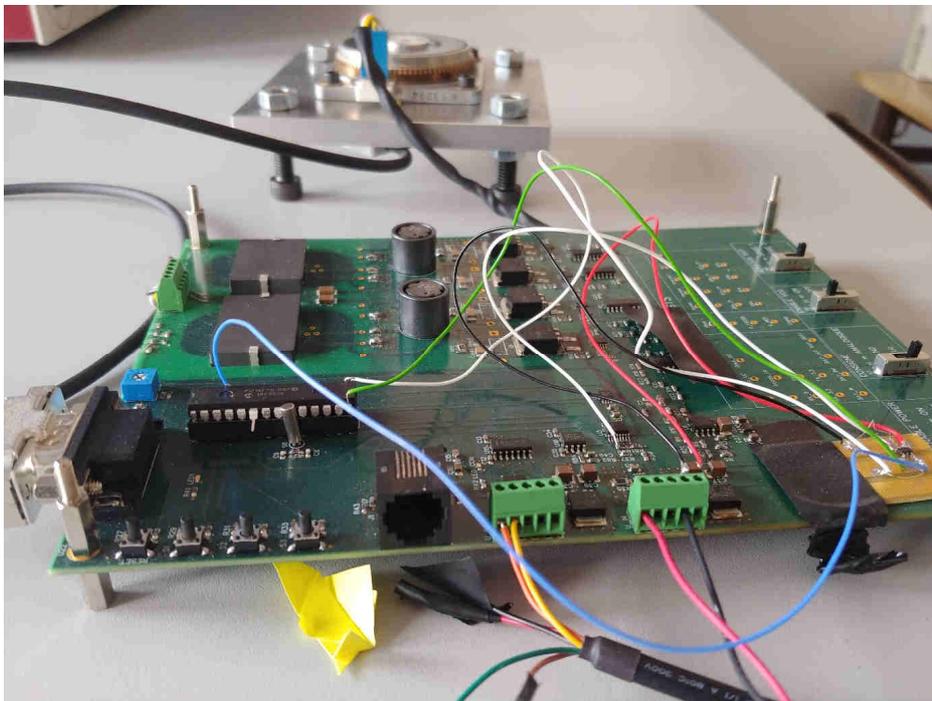


Figure 24 : Carte de contrôle et de puissance sans limite de facteur de forme