

Conception et réalisation d'un ensemble de propulsion ionique embarqué pour un dirigeable

SAPHIRE : 208
 PROPULSEUR IONIQUE
 ANNÉE : 2023/2024

Encadrant : ADAM Fabien

Étudiants : AHMIDACH Chemsdine & MORARD Eliot & SÉGUY Gatien
 & PERSONNAZ Melchior & DAHAN Samuel

école
normale
supérieure
paris-saclay

université
PARIS-SACLAY

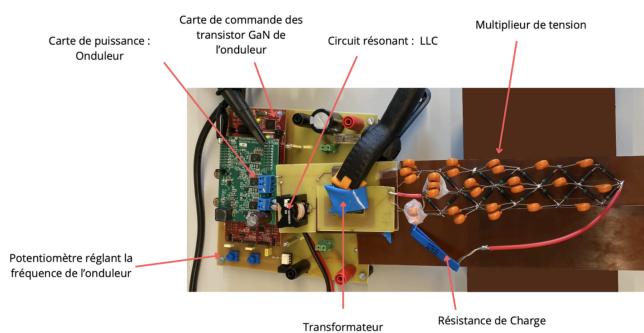


FIGURE 1 – Alimentation haute tension

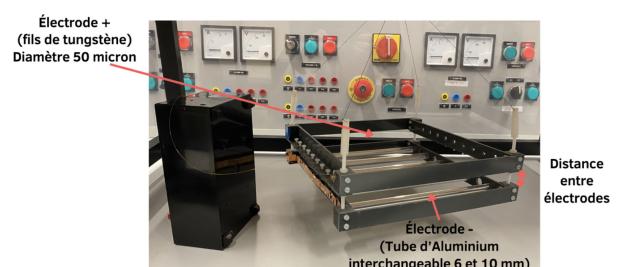


FIGURE 2 – Prototype du propulseur ionique

Table des matières

1	Introduction	4
2	Propulseur ionique (S1)	5
2.1	Principe physique	5
2.1.1	Définitions des variables	7
2.1.2	Champ Électrique	7
2.1.3	Expression de L_c	7
2.1.4	Densité de Courant Ionique	7
2.1.5	Force Électrostatique	7
2.1.6	Poussée	8
2.2	Sécurité	8
2.3	Expérimentale	10
2.3.1	Objectifs	10
2.3.2	Matériel	10
2.3.3	Élaboration d'un premier prototype	11
2.3.4	Méthode	11
2.3.5	Résultats	13
2.3.6	Conclusiuon	14
3	Alimentation haute tension (S2)	15
3.1	Cahier des charges	15
3.2	Principe de fonctionnement	15
3.3	Étude du LLC et du transformateur	15
3.3.1	Dimensionnement du transformateur	15
3.3.2	Étude théorique du LLC	17
3.3.3	Étude de simulation du LLC	18
3.3.4	Étude pratique	18
3.3.5	Résultats du LLC	20
3.4	Voltage Multiplior	20
3.4.1	Principe de fonctionnement	20
3.4.2	Étude théorique	21
3.4.3	Étude en simulation	22
3.4.4	Choix des composants	23
3.4.5	Montage final	23
3.5	Montage global	24
3.5.1	Partie Chassis Prototype	24

3.5.2	Partie électrique	25
3.5.3	Problème d'inductance	26
3.5.4	Autres composants	27
3.5.5	Conclusion	27

1 Introduction

La propulsion ionique est déjà largement utilisée dans le domaine spatial, notamment pour la propulsion de satellites. Offrant une faible poussée, elle a l'intérêt de ne pas utiliser uniquement de l'énergie chimique, comme les propulseurs spatiaux classiques, mais également de l'énergie électrique utilisée pour propulser un gaz ionisé. Énergie électrique disponible en grande quantité grâce au soleil, elle obtient, à masse équivalente embarquée, une bien meilleure autonomie.

Dans le contexte de réaliser un propulseur pour un dirigeable, la masse devient un élément clé. Tenter d'implémenter une solution ionique prend alors tout son sens, sachant que, contrairement aux satellites, l'utilisation de l'air environnant par le biais de l'effet Corona nous permettra de nous passer de carburant d'appoint.

De plus, l'absence de pièces mobiles dans les propulseurs ioniques utilisant l'effet Corona minimise l'usure mécanique et les risques de défaillance. Les moteurs traditionnels comportent de nombreuses pièces mobiles sujettes à l'usure et nécessitant un entretien régulier. En éliminant ces composants, les propulseurs ioniques peuvent offrir une fiabilité accrue et des coûts de maintenance réduits.

Enfin, ces propulseurs sont extrêmement silencieux, ce qui constitue un avantage considérable pour réduire la pollution sonore, particulièrement autour des zones urbaines et des aéroports. Le bruit des moteurs à combustion est une source majeure de nuisance, et les propulseurs ioniques pourraient grandement améliorer la qualité de vie des populations vivant à proximité des routes aériennes.

La propulsion ionique est déjà largement utilisée dans le domaine spatial, notamment pour la propulsion de satellites. Offrant une faible poussée, elle a l'intérêt de ne pas utiliser uniquement de l'énergie chimique, comme les propulseurs spatiaux classiques, mais également de l'énergie électrique utilisée pour propulser un gaz ionisé. Énergie électrique disponible en grande quantité grâce au soleil, elle obtient, à masse équivalente embarquée, une bien meilleure autonomie.

Dans le contexte de réaliser un propulseur pour un dirigeable, la masse devient un élément clé. Tenter d'implémenter une solution ionique prend alors tout son sens, sachant que, contrairement aux satellites, l'utilisation de l'air environnant par le biais de l'effet Corona nous permettra de nous passer de carburant d'appoint.

De plus, l'absence de pièces mobiles dans les propulseurs ioniques utilisant l'effet Corona minimise l'usure mécanique et les risques de défaillance. Les moteurs

traditionnels comportent de nombreuses pièces mobiles sujettes à l'usure et nécessitant un entretien régulier. En éliminant ces composants, les propulseurs ioniques peuvent offrir une fiabilité accrue et des coûts de maintenance réduits.

Enfin, ces propulseurs sont extrêmement silencieux, ce qui constitue un avantage considérable pour réduire la pollution sonore, particulièrement autour des zones urbaines et des aéroports. Le bruit des moteurs à combustion est une source majeure de nuisance, et les propulseurs ioniques pourraient grandement améliorer la qualité de vie des populations vivant à proximité des routes aériennes.

Conclusion

Nous allons donc réaliser une esquisse d'un propulseur ionique accompagnée de son alimentation. La masse sera un point crucial.

2 Propulseur ionique (S1)

2.1 Principe physique

L'effet Corona est un phénomène électrique qui se produit lorsqu'un champ électrique intense ionise le gaz environnant, créant ainsi un plasma qui peut conduire l'électricité. Si le champ dépasse une certaine intensité (appelée champ disruptif), il arrache des électrons des molécules d'air, créant des ions positifs et des électrons libres.

Pour obtenir ce fort champ électrique, on charge électriquement un conducteur ayant des bords "saillants". Ainsi, l'effet des pointes va générer un fort champ électrique autour de ces saillances, ionisant l'air. On obtient ainsi un dispositif qui, au-delà d'un certain seuil de tension, crée un gaz ionisé autour d'une électrode (appelée électrode de décharge). Si l'on réalise l'électrode opposée (électrode collectrice) avec peu d'effet des pointes, on pourra ainsi accélérer les charges sous l'effet du champ généré entre ces électrodes. On distingue alors deux types d'effets Corona :

Effet Corona positif

L'électrode de décharge est chargé positivement :

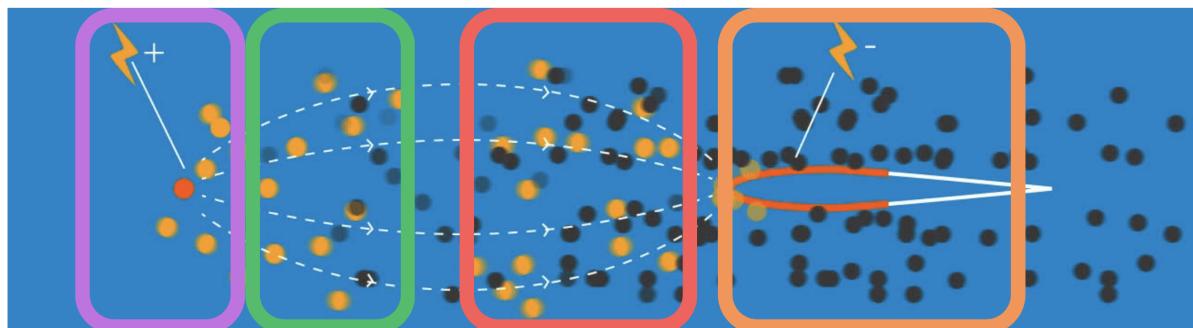
- ⇒ Les électrons arrachés sont accélérés vers l'électrode positive, tandis que les ions positifs sont repoussés et se déplacent vers l'électrode collectrice négative.
- ⇒ Les électrons accélérés peuvent entrer en collision avec d'autres molécules d'air, causant davantage d'ionisations et créant une avalanche électronique.

Sur le plan de la génération de ions nocifs et des risques pour la santé et la sécurité, l'effet Corona positif est généralement préféré. Il tend à produire moins de composés réactifs dangereux comme l'ozone et les ROS. Ce dernier est donc choisi et est représenté sur la figure 3.

Effet Corona négatif

L'électrode de décharge est chargé négativement :

- ⇒ Les ions positifs sont attirés vers l'électrode négative, tandis que les électrons sont repoussés et se déplacent vers l'électrode collectrice positive.
- ⇒ Les ions positifs, accélérés vers l'électrode négative, peuvent provoquer davantage d'ionisations en entrant en collision avec d'autres molécules d'air, créant une avalanche ionique.



- Effet Corona : Haute tension + Pointes = Ionisation locale de l'air
- Électrodynamique: Ions + Champs électrique = Accélération des Ions.
- Chocs ions/particules d'air : Chocs Ions avec Particules d'air = Accélération des particules d'air
- Mécanique des fluides.

FIGURE 3 – Schéma du principe de fonctionnement.

Les électrons se rattachent à l'électrode de décharge tandis que les ions sont accélérés vers le collecteur. En chemin, ces ions rencontrent des molécules d'air qui sont accélérées à leur tour par des collisions. Un vent ionique est ainsi généré créant une poussée.

2.1.1 Définitions des variables

Nous considérons les variables suivantes :

- ϕ : Tension appliquée.
- ϕ_0 : Tension d'initiation de l'effet corona.
- L_c : Longueur caractéristique de l'interaction.
- ϵ : Permittivité du milieu.
- μ_b : Mobilité des ions.
- A : Surface de l'interaction.
- I : Courant ionique.
- S_c : Section efficace de collision.

2.1.2 Champ Électrique

Le champ électrique E généré par l'effet corona est dû à la différence de tension entre l'application de la tension ϕ et la tension d'initiation ϕ_0 . Le champ électrique moyen sur la distance L_c peut être approximé par :

$$E = \frac{\phi - \phi_0}{L_c}$$

2.1.3 Expression de L_c

La longueur caractéristique L_c , dépendant de la distance entre les électrodes d , est exprimée par :

$$L_c = 10 + \beta(d - 10)$$

Où β est un facteur d'échelle pour la longueur caractéristique à déterminer empiriquement. ($\beta \approx 1$)

2.1.4 Densité de Courant Ionique

En appliquant la loi d'Ohm pour un milieu ionisé, nous avons : $J = \mu_b \epsilon E$
Substituant E dans l'équation précédente, nous obtenons :

$$J = \mu_b \epsilon \left(\frac{\phi - \phi_0}{L_c} \right)$$

2.1.5 Force Électrostatique

La force électrostatique exercée par le champ électrique sur les charges est :
 $F = J A L_c = \mu_b \epsilon A \left(\frac{\phi - \phi_0}{L_c} \right) L_c = \mu_b \epsilon A (\phi - \phi_0)$

2.1.6 Poussée

En considérant les collisions et l'équation de la mécanique des fluides, la formule finale de la poussée est ajustée pour inclure un terme de correction lié au courant ionique et à la mobilité :

$$F = \frac{9\epsilon(\phi - \phi_0)}{8L_c^2} - \frac{IdSC_D}{\mu_b A}$$

On peut donc tracer l'évolution de cette poussée théorique par mètre d'électrode en fonction de la tension et de la distance entre électrodes en imaginant une géométrie d'une électrode de décharge constitué d'un fil très fin pour maximiser l'effet des pointes et d'une électrode de collecteur constitué d'un tube plus large (voir figure 4).

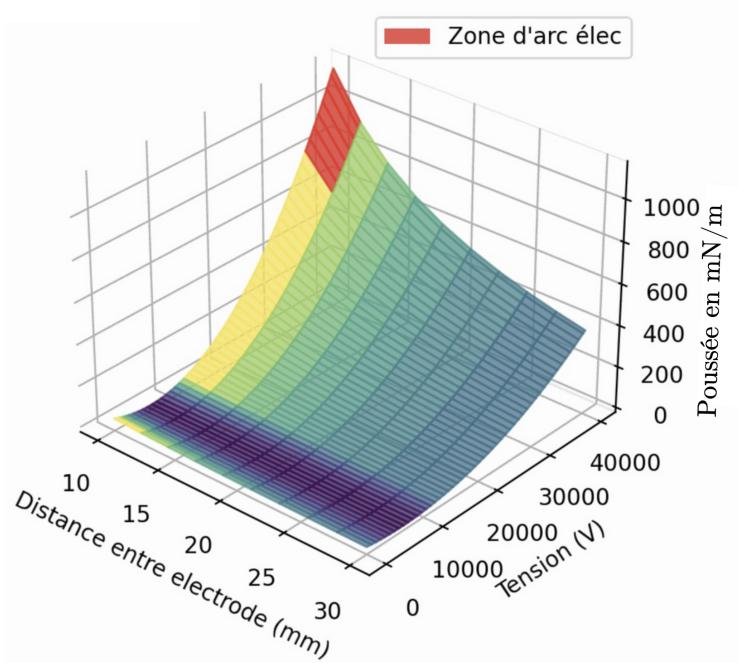


FIGURE 4 – Poussé par mètre d'électrode en fonction de la tension et de la distance entre électrodes

2.2 Sécurité

Contrairement à une idée répandue, le risque d'électrocution n'est pas directement lié à la tension, mais dépend principalement de l'intensité du courant (ampérage) et du temps qu'il met à traverser le corps. Le courant traversant le corps humain est donc l'élément à surveiller en cas d'exposition.

- À des intensités très faibles (moins de 1 mA), le courant peut être imperceptible ou provoquer une légère sensation de picotement.
- Entre 1 mA et 10 mA, le courant peut causer une sensation de choc, mais généralement sans dommage durable.
- Entre 10 mA et 20 mA, le courant peut provoquer des contractions musculaires, rendant difficile le lâcher prise d'un objet électrifié.
- Entre 20 mA et 100 mA, le courant peut provoquer des spasmes musculaires sévères et des douleurs intenses. Il peut également perturber le rythme cardiaque, entraînant des fibrillations ventriculaires potentiellement mortelles.
- Au-delà de 100 mA, le courant peut causer des brûlures internes et externes graves, des dommages importants aux organes internes et souvent la mort en quelques secondes.

Sachant que la résistance du corps humain prise entre deux extrémités (d'un bras à l'autre par exemple) est de l'ordre de quelques dizaines de $k\Omega$, des tensions au-delà de 100V présentent déjà des risques. Pour une géométrie d'électrode favorisant l'effet Corona, une tension de plusieurs kV est tout de même nécessaire. Nous devons donc prendre des **précautions**.

Nous nous basons donc sur la norme **IEC 61010-1** qui assure la sécurité lors des manipulations. Il en vient une limitation de la capacité électrique du propulseur :

- Charge de $45 \mu C$ pour des tensions allant jusqu'à 15 kV en crête ou en courant continu.
- 350 mJ d'énergie stockée pour des tensions supérieures à 15 kV en crête ou en courant continu.

L'ensemble des expériences sera réalisé sous cloche protectrice assurant de ne pas pouvoir être en contact avec les éléments sous tensions (voir 5)

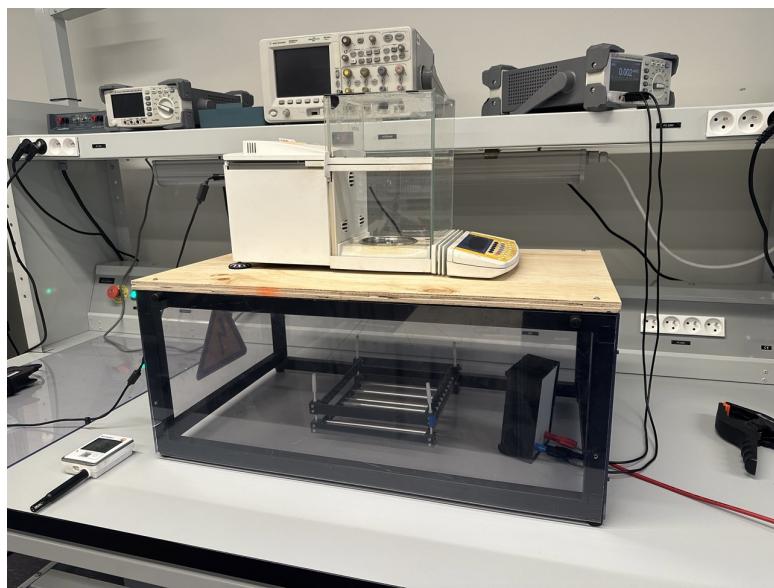


FIGURE 5 – Cloche protectrice Haute-tension

2.3 Expérimentale

L'objectif de cette expérience est de mesurer la poussée d'un moteur ionique en fonction de plusieurs paramètres : tension, distance entre électrodes, et diamètre de la cathode. Le propulseur ionique utilise l'effet Corona pour générer une poussée, et il est alimenté par une alimentation haute tension.

2.3.1 Objectifs

- Mesurer la poussée du moteur ionique en fonction de :
- Tension variant de 0 à 20 000V
- Distance entre électrodes variant de 16 mm à 45 mm
- Diamètre de la cathode (6 mm ou 10 mm)

2.3.2 Matériel

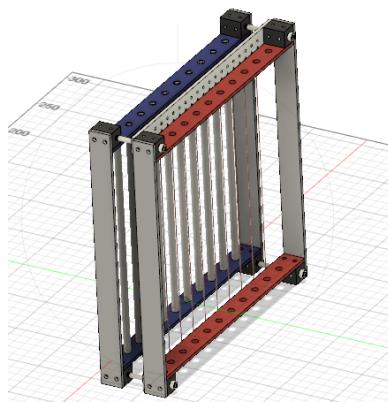
- Moteur Ionique
- Alimentation Haute Tension
- Système de Mesure de Poussée : Mesure de la poussée par différentiel de poids.
- Enceinte de Sécurité : Enceinte haute tension pour sécuriser l'expérimentation.
- Électrodes :
 - Cathode de diamètre 6 mm et 10 mm.
 - Anode en tungstène de 50 microns de diamètre.
 - Distance ajustable entre les électrodes (16 mm à 45 mm).

2.3.3 Élaboration d'un premier prototype

Pour concrétiser notre étude sur le phénomène observé, nous avons entrepris la réalisation d'un premier prototype. Ce prototype a été spécialement conçu pour permettre une observation détaillée des effets Corona en fonction de la distance entre les armatures supérieures (anode) et inférieures (cathode). La possibilité de régler cette distance est cruciale pour notre recherche, car elle nous permet d'identifier la configuration optimale de notre système.

Notre prototype intègre un mécanisme ajustable, comprenant des vis en téflon qui facilitent la gestion précise de l'écart entre l'anode et la cathode. Cette conception nous offre la flexibilité nécessaire pour modifier les distances et ainsi observer les variations des effets Corona. Les ajustements permettent non seulement de valider les hypothèses initiales sur le phénomène, mais aussi d'affiner les paramètres pour une efficacité maximale.

Pour illustrer, voici une conception assistée par ordinateur (CAO) de notre prototype. On peut y voir clairement les deux vis en téflon, qui jouent un rôle central dans la régulation de l'écart entre les électrodes. De plus, les fils de cuivre connectant les armatures sont visibles, soulignant la configuration pratique et fonctionnelle de notre dispositif expérimental. Grâce à ce prototype, nous serons en mesure de mener des tests rigoureux et d'optimiser notre système en fonction des résultats observés.



(a) Prototype sur Fusion360

2.3.4 Méthode

1. Ajuster la distance entre les électrodes selon les paramètres de l'expérience.
2. Sélectionner le diamètre approprié de la cathode pour chaque série de mesures.

3. Installer le moteur ionique dans l'enceinte de sécurité.
4. Connecter l'alimentation haute tension au moteur ionique.

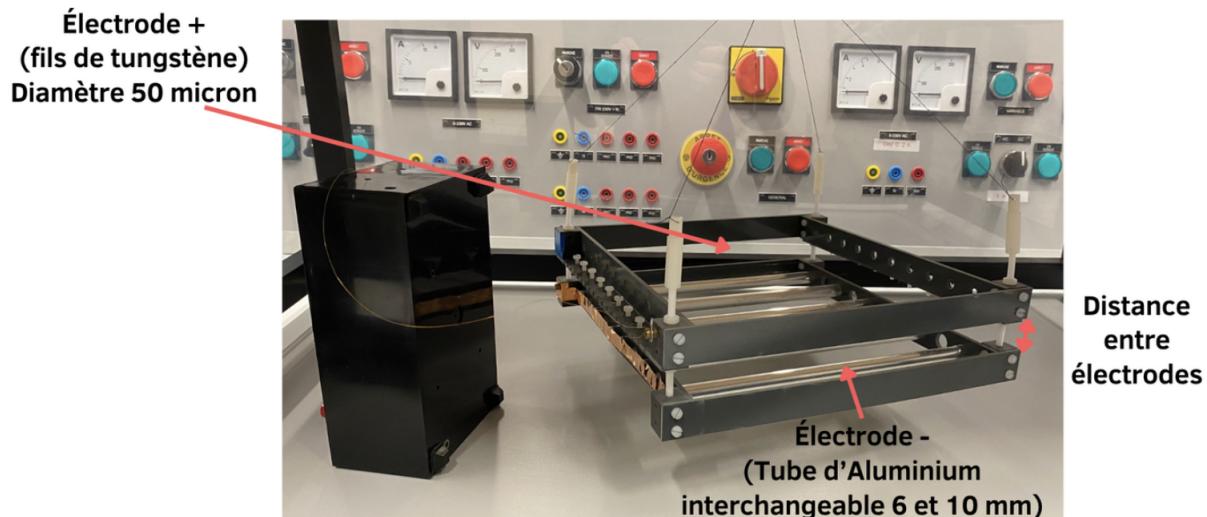


FIGURE 7 – Photo du montage expérimental.

2.3.5 Résultats

Ainsi, nous avons pu tracer les courbes suivantes :

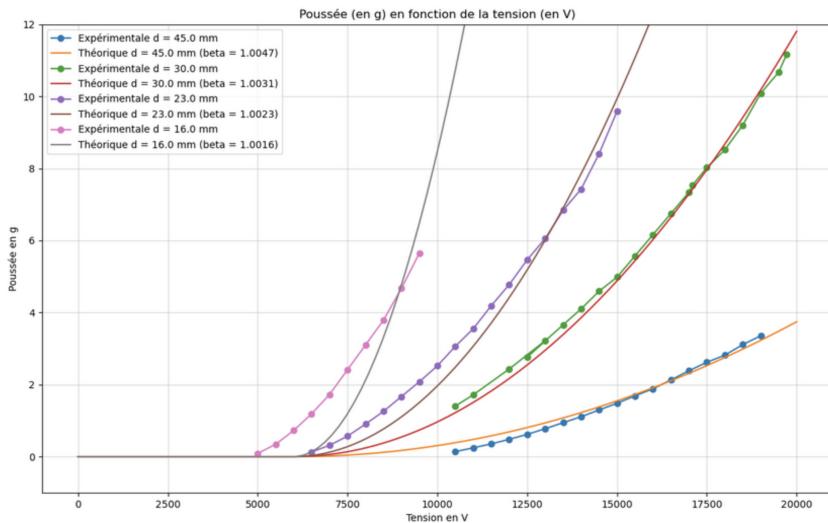


FIGURE 8 – Poussée en g en fonction de la tension en V (comparaison théorie et expérimentation)

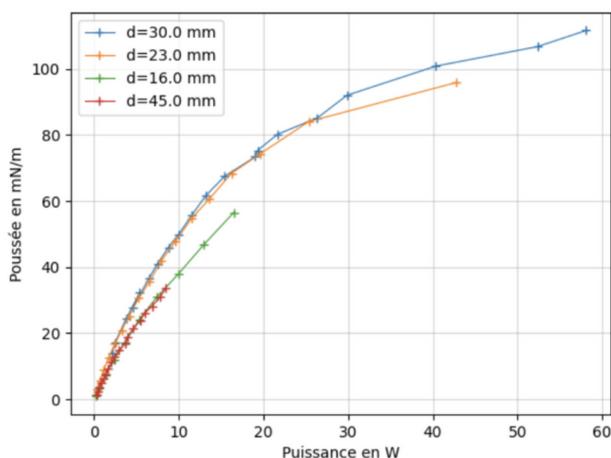


FIGURE 9 – Poussée (mN/m) en fonction de la puissance (W).

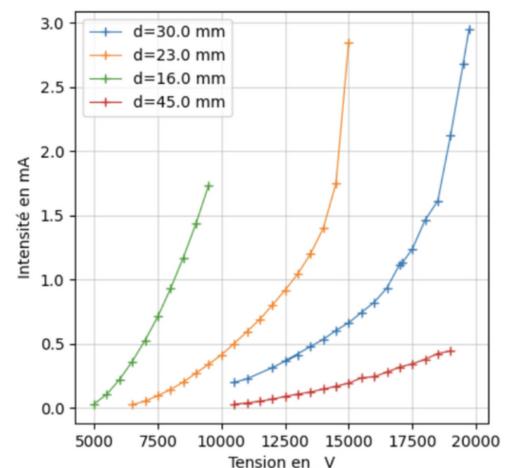


FIGURE 10 – Intensité (mA) en fonction de la tension d'entrée (V).

Tension	Puissance	Distance entre électrodes	Poussée	Rapport poussée/puissance
20 000V	60 W	30mm	11 g	0.18 g/W

2.3.6 Conclusion

Les résultats expérimentaux confirment les prévisions théoriques dans une large mesure, bien que des différences existent dues aux facteurs pratiques tels que les pertes et les conditions atmosphériques... Les variations observées en fonction de la distance entre les électrodes soulignent l'importance de l'optimisation géométrique pour maximiser les performances. On retiendra la configuration de la distance entre électrodes de 30mm amenant à une poussée maximale de 11g.

3 Alimentation haute tension (S2)

3.1 Cahier des charges

Le but est de concevoir et réaliser un convertisseur DC/DC capable de transformer une tension de 48V DC en 20kV DC, nécessaire pour alimenter le propulseur ionique, le tout pour une puissance délivrée d'une cinquantaine de watt. Une attention particulière à la masse du dispositif est attendue pour ne pas excéder 200 grammes.

3.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du convertisseur reprend les travaux précédents, notamment ceux du MIT ([2]). Le convertisseur se compose d'un onduleur alimentant un circuit LLC résonnant. Ce dernier est branché à un transformateur, qui assure encore un gain en tension. Ensuite, un multiplicateur de tension assure le redressement et offre de plus le reste du gain nécessaire.

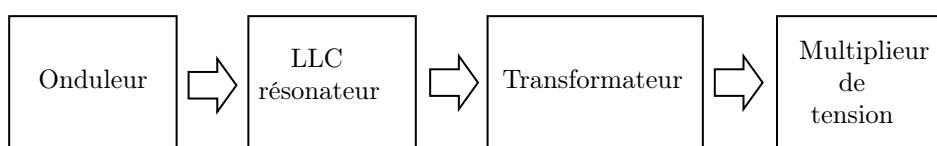


FIGURE 11 – Principe de fonctionnement du convertisseur

3.3 Étude du LLC et du transformateur

3.3.1 Dimensionnement du transformateur

Le transformateur est un composant essentiel de l'élévation de tension. Cependant, nous devons restreindre la masse du noyau afin de se conformer aux exigences fixées par le cahier des charges. Pour remédier à ce problème, nous avons choisi de travailler à haute fréquence. En effet, la densité énergétique du noyau augmente avec la fréquence. De plus, compte tenu des limites de l'onduleur utilisé, nous avons fixé une fréquence de fonctionnement autour de 500 kHz.

Ce paramètre désormais établi nous a permis de choisir un noyau de faible masse et correctement dimensionné pour éviter la saturation magnétique. Il a aussi fallu tenir compte des éventuelles pertes dans le but d'obtenir le meilleur rendement et de limiter la chauffe. Notre choix s'est porté sur un noyau en ferrite 3F4 dont les dimensions sont suffisamment petites pour limiter les pertes à 4W (sur 60W), mais assez grandes pour éviter la saturation magnétique.



FIGURE 12 – *Planar E Core*, demi-noyau en ferrite 3F4

Pour des raisons pratiques les spires ont été imprimées sur des PCB. Nous avons dimensionné la largeur de celles-ci en estimant le courant qui devait y passer. Avec un gain de 4 (en tension) en amont du transformateur, les spires du circuit primaire sont traversées par un courant de 2.5 A, ce qui implique une largeur de 1,8 mm (pour une épaisseur de 35 μm). Au secondaire, après un rapport de transformation de 16, l'épaisseur nécessaire de 0.15mm est au-dessous la résolution de nos capacités de production. La largeur choisie est la minimale : 0.4 mm.

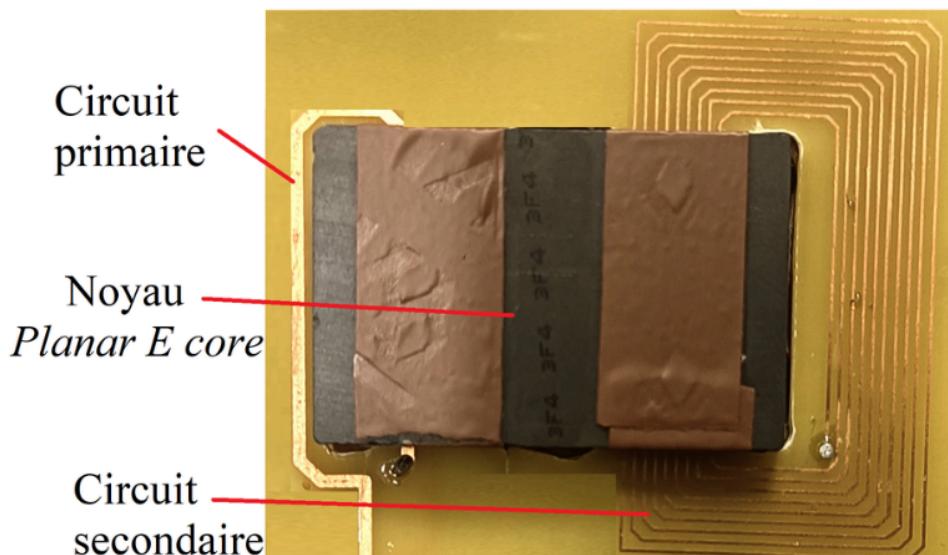


FIGURE 13 – Transformateur et circuits magnétiques

Sur cette image, nous n'observons qu'une seule face de carte imprimée en double-face. De plus, pour atteindre le rapport de transformation de 16, nous avons ajouté au secondaire un circuit magnétique identique à celui visible ici.

3.3.2 Étude théorique du LLC

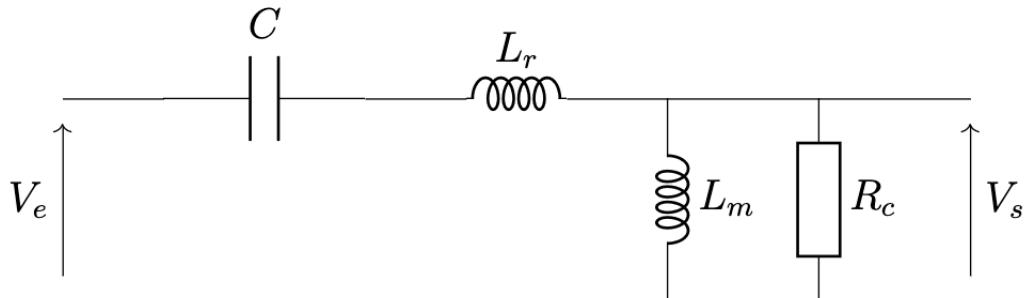


FIGURE 14 – Schéma électrique de la cellule LLC.

Nous cherchons à déterminer la fonction de transfert du LLC car celle-ci nous permettrait, par une approche itérative, de trouver le 3-uplet (L_r, L_m, C) qui résonne à $f_r = 500kHz$ et permet des courants traversant les bobines de l'ordre de 5A.

Calcul de la fonction de transfert du circuit LLC :

On note :

$$Z_1 = j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{j\omega L_m} \quad (2)$$

On en déduit, en utilisant un pont diviseur de tension, que :

$$H(j\omega) = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{1 + Z_1 Y_2} \quad (3)$$

D'où :

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + (j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C})(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{j\omega L_m})} \quad (4)$$

$$H(j\omega) = \frac{(j\omega)^2 R_c L_m C}{(j\omega)^2 R_c L_m C + (1 + (j\omega)^2 C L_r)(R_c + j\omega L_m)} \quad (5)$$

$$H(j\omega) = \frac{(j\omega)^2 R_c L_m C}{(j\omega)^2 R_c L_m C + R_c + j\omega L_m + (j\omega)^2 C L_r R_c + (j\omega)^3 C L_r L_m} \quad (6)$$

Ainsi, le programme Python permettant de trouver le triplet de valeurs nous donne :

Composants	L_r	L_m	C
Valeurs	$92\mu H$	$10\mu H$	$1nF$

TABLE 1 – Valeurs des composants pour obtenir une résonance à $f_r = 500kHz$.

3.3.3 Étude de simulation du LLC

À l'aide du logiciel de simulation LTSpice, nous pouvons simuler le comportement du LLC afin d'obtenir les caractéristiques nécessaires pour choisir les composants en ramenant la résistance du moteur au secondaire du transformateur ($R = 1852\Omega$) :

— Pour les condensateurs :

— Tension crête (U_{max})

— Pour les bobines :

- Courant efficace
- Courant maximal

Composants	L_r	L_m	C
Valeurs	$92\mu H$	$10\mu H$	$1nF$
Courant efficace (A)	4.0568	4.0456	4.0568
Courant max (A)	6.05	6.05	-
Tension crête (V)	-	-	185

TABLE 2 – Valeurs des composants et leurs caractéristiques pour une entrée de 48V à $f = 498kHz$.

3.3.4 Étude pratique

Nous mesurons les inductances de fuite (modélisées par L_r dans notre modèle LLC + transfo) et magnétisante (modélisée par L_m dans notre modèle LLC + transfo).

Composants	L_r (avec entrefer)	L_m (sans entrefer)	L_m (avec entrefer)	m
Valeurs	$200nH$	$6.8\mu H$	$2.6\mu H$	9

TABLE 3 – Valeurs caractéristiques du transformateur V2.

Nous constatons que L_m mesurée est bien plus faible que celle voulue. Il est donc nécessaire de rajouter une inductance en série avec L_r dans notre LLC pour obtenir les valeurs théoriques des composants nécessaires à la résonance à $f_r = 500kHz$.

Ainsi, il faut ajouter une inductance :

$$L_+ \approx 100\mu H$$

Composants	L_+	L_r mesurée	L_m mesurée	C
Valeurs	$100\mu H$	$200nH$	$10\mu H$	$1nF$
Courant efficace (A)	4.8	4.8	4.8	4.8
Courant max (A)	8.91	8.91	8.91	8.96
Tension crête (V)	-	-	-	270

TABLE 4 – Valeurs des composants et caractéristiques pour une entrée crêteau de 48V à $f = 484kHz$.

Nous rencontrons une difficulté : il n'existe pas de condensateur de $1nF$ capable de supporter des courants de 9A. Pour résoudre ce problème, nous abaissons L_m , ce qui a pour effet de diminuer le courant.

Finalement, nous trouvons les composants correspondant chez le fabricant Far-nell.

Inductance L_+

Datasheet : WURTH ELEKTRONIK Inductance de puissance (CMS), $100 \mu H$, 8.8 A, Blindé, 9.7 A, WE-HCF.

Condensateur C

Datasheet : Condensateur de puissance, PP Métallisé, Coffret Radial, 2 broches, 1000 pF, +/- 10%, Snubber

Vérifions tout de même le comportement fréquentiel du condensateur et de l'inductance ajoutée ainsi que leurs impédances.

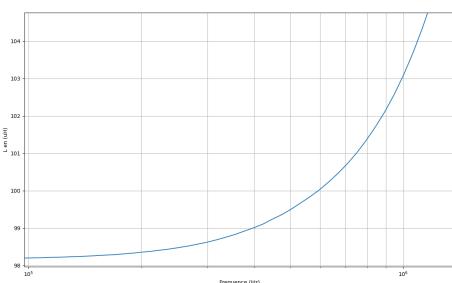


FIGURE 15 – Inductance (L) en μH .

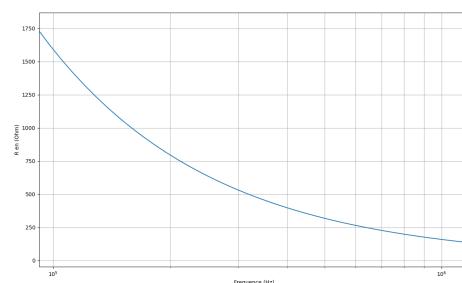


FIGURE 16 – Résistance de la capacité.

3.3.5 Résultats du LLC

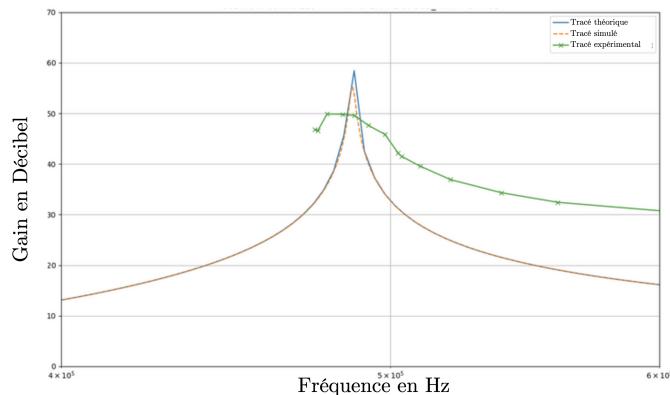


FIGURE 17 – Gain en dB en fonction de la fréquence en Hz. Comparaison théorique, simulation et expérimentale.

Conclusion

Les résultats expérimentaux montrent que, le système résonne bien à la fréquence prévue. Cependant, le gain obtenu est inférieur à celui attendu théoriquement et simulé. Cela suggère que des améliorations peuvent être apportées pour réduire les pertes et optimiser les performances du circuit. En effet, lors de l’expérimentation, nous avons pu constater que l’inductance rajoutée au LLC chauffe beaucoup ce qui est synonyme de pertes significatives.

En conclusion, les tests réalisés valident la conception globale de l’alimentation haute tension, tout en soulignant une nécessité d’ajustements pour optimiser les performances.

3.4 Voltage Multiplior

3.4.1 Principe de fonctionnement

Un multiplicateur de tension est un circuit électronique qui convertit une tension alternative ou une tension continue pulsée en une tension continue plus élevée que l’amplitude du fondamentale. Un multiplicateur de tension typique est constitué de plusieurs étages, chaque étage comprenant deux diodes et deux condensateurs.

Le circuit utilise une source de tension alternative V_{in} comme entrée. La tension AC est essentielle car elle permet de charger et de décharger les condensateurs alternativement :

- Pendant la première demi-onde positive de V_{in} , le premier condensateur C_1 se charge à la tension de crête (V_{peak}) à travers la première diode D_1 .
- Pendant la demi-onde négative suivante, le premier condensateur C_1 se décharge partiellement à travers la deuxième diode D_2 et charge le deuxième condensateur C_2 à une tension égale à $2 \times V_{peak}$ (somme de la tension de C_1 et de V_{in}).

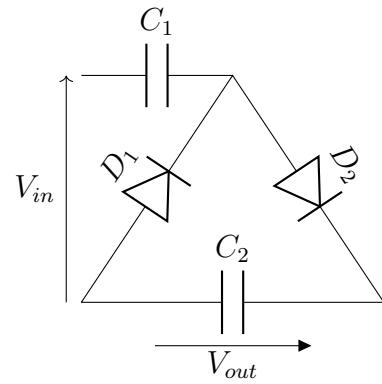


FIGURE 18 – Étage élémentaire

En théorie si on répète N fois cette étage élémentaire on obtient un gain en tension qui vaut $2 \times N$. En pratique, si les capacités sont de valeur trop faibles, la tension à leurs bornes lors d'une demi-onde chute diminuant ainsi de la gain du montage. Dans un cas extrême le fonctionnement du dispositif n'est plus assuré. Deux phénomène interviennent :

- ⇒ Une chute de la composante continue du signal de sortie qui entraîne une baisse d'efficacité du dispositif (gain plus faible). Essentiellement due à la capacité D_1 .
- ⇒ Une ondulation de la tension de sortie, pas nécessairement un problème dans notre cas mais cela génère des pics de tension plus important pour la même tension continue de sortie. Les composants doivent alors être surdimensionnée du point de vue de la tenue en tension.

Conclusion

Le dimensionnement des capacités est donc un aspect primordiale et fera l'objet d'une attention toute particulière. On cherchera pour minimiser la masse du dispositif à prendre une capacité totale C_{tot} la plus faible possible.

3.4.2 Étude théorique

On peut retrouver (voir article ??) que pour un multiplicateur de tension, la répartition idéale des valeurs des capacités est la suivante : si on considère une capacité C , alors pour l'étage n (compté dans le sens décroissant à partir de l'entrée) si on prend $C_n = n \times C$ pour les deux capacités de l'étage n , on obtient les meilleurs résultats tout en ayant une capacité totale la plus faible possible.

3.4.3 Étude en simulation

La complexité du montage notamment des composants non-linéaire (diode) rendent difficile une étude purement théorique. On va donc réaliser des simulations sur LTspice pour sélectionner correctement le nombre d'étages ainsi que la capacité C.

La simulation nous révèle que utiliser un double multiplicateur de tension comme montré figure 23 permet à gain égale de diminuer d'un tiers la capacité totale C_{tot} . On choisit donc cette solution.

La simulation nous donne que une valeur de 100pF pour C nous permet de ne pas trop subir les chutes de tensions de capacité notamment avec un grand nombre d'étage tout en restant dans des valeurs de capacité contenue et donc de masse pas trop importante.

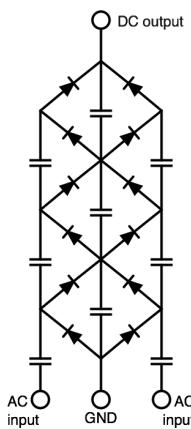


FIGURE 19 – Double VM

Le gain évolue avec le nombre d'étage, on évalue cette dépendance dans le figure 22. On peut aussi également observer la valeur de capacité C_{tot} associée. On se place à 450kHz, tension de fonctionnement de la cellule LLC.

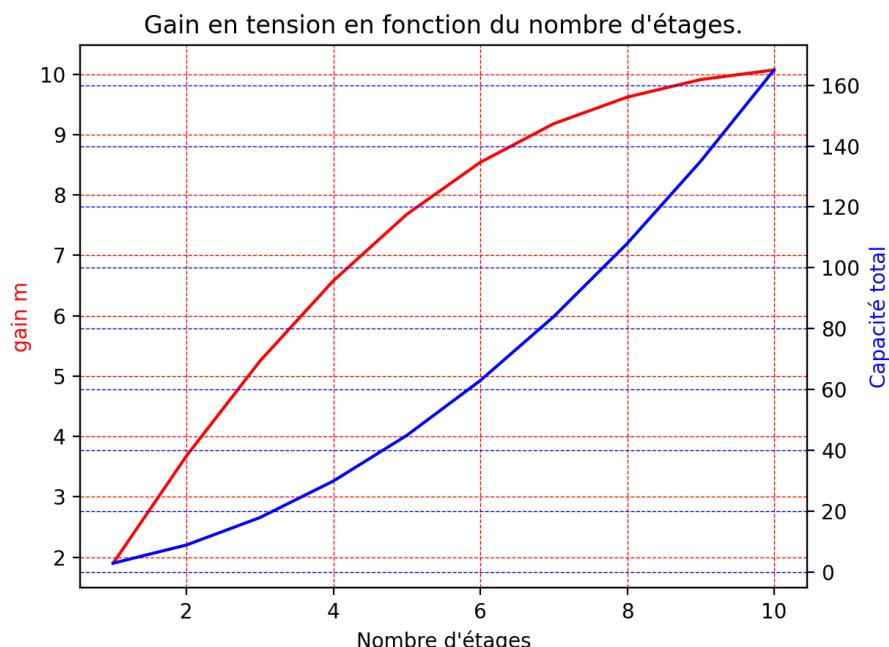


FIGURE 20 – Évolution du gain et de C_{tot} en fonction du nombre d'étage

On remarque que prendre 6 étages est un bon compromis entre gain en tension élevé et capacité totale pas trop importante.

3.4.4 Choix des composants

Condensateur	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Valeurs (pF)	600	600	500	500	400	400	300	300	200	200	100	100
Valeur moyenne Tension (kV)	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.6	3
Tension max (kV)	2.07	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

TABLE 5 – Valeurs et tenue en tension composants VM à $f = 450\text{kHz}$.

Les diodes et capacités doivent tenir 4kV pour un fonctionnement avec en sortie 20kV. Les composants sont choisies en conséquences.

- ⇒ Diode utilisée : Le fabricant VMI est spécialisé dans les diodes à haute tenue en tension, l'idéale est la X150FF3 (37 € pièce) d'après le MIT. La 1N6533 est plus économique mais un peu moins efficace (20 € pièce). Ces composants sont hors de notre budget. On prend donc des diodes bien moins efficaces mais surtout moins cher.
- ⇒ Capacité utilisé : on choisit des capacité non polarisé qui tiennent la tension à leurs borne.

3.4.5 Montage final

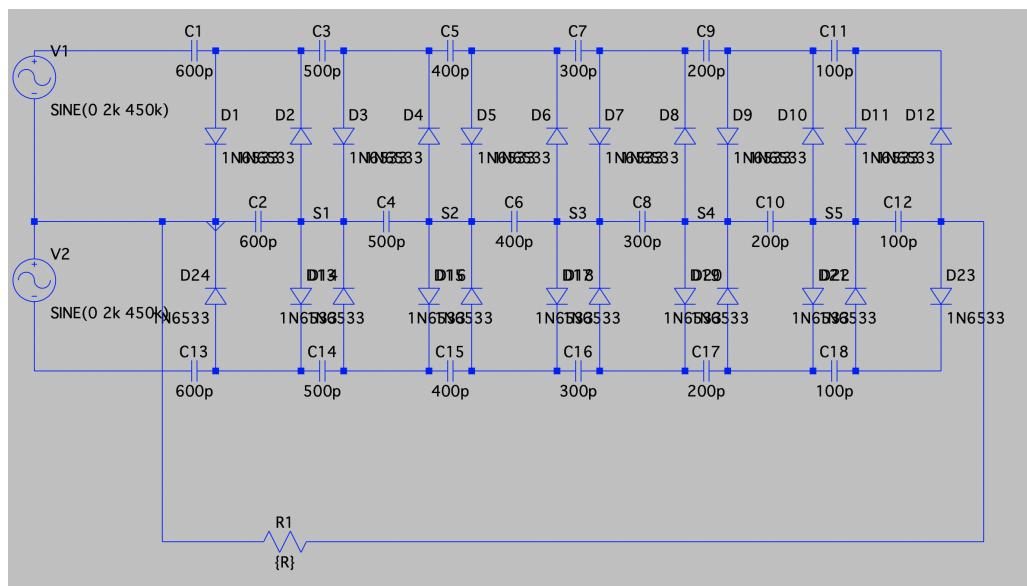


FIGURE 21 – Simulation

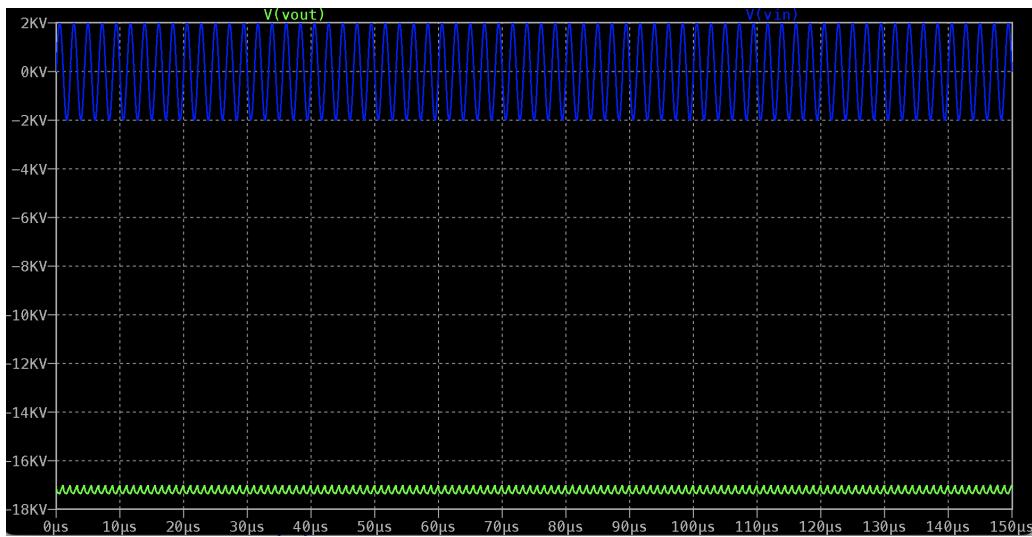


FIGURE 22 – Tension de sortie (vert) et tension d'entrée (bleu) du multiplicateur de tension

Conclusion

Le gain du multiplicateur de tension utilisé est de 8. Il peut fournir jusqu'à 20kV en sortie avec une faible oscillation résiduelle.

3.5 Montage global

3.5.1 Partie Chassis Prototype

Pour optimiser notre prototype initial, nous avons réduit la masse du châssis en utilisant la CAO avancée. Des tests de contraintes sur OGL Fusion 360 ont permis de minimiser les contraintes de torsion et autres contraintes mécaniques, surtout celles dues à l'accrochage supérieur dans notre cadre expérimental. Grâce à ces analyses, nous avons conçu une nouvelle CAO du châssis, réduisant sa masse par 3, passant à **123g** tout en améliorant sa résistance.

Cette optimisation a abouti à un prototype allégé et plus performant pour nos tests des effets Corona. Cette fois-ci, la distance ne peut plus être réglée comme souhaité; nous avons choisi une distance fixe de 30 cm entre les deux compartiments, car elle permettait d'obtenir les meilleurs résultats pour l'effet Corona. Cette distance sera respectée pour toutes les expériences.

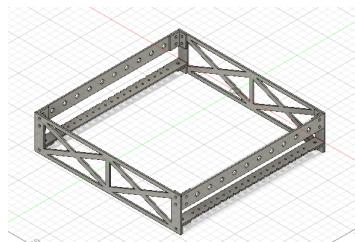


FIGURE 23 – CAO optimisée en masse

3.5.2 Partie électrique

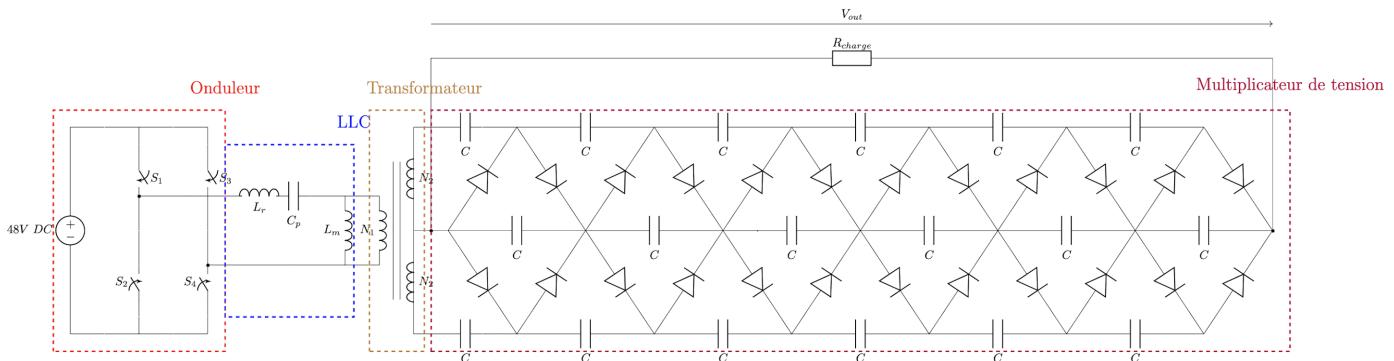


FIGURE 24 – Schéma électrique du montage final.

Nous avons réalisé le montage global en intégrant le LLC, le transformateur et le multiplicateur de tension. Après avoir réglé les commandes des transistors de l'onduleur, nous avons effectué plusieurs tests pour évaluer le comportement du système complet.

Le montage global inclut les éléments suivants :

- Carte de puissance : Onduleur
- Carte de commande des transistors GaN de l'onduleur
- Circuit résonant : LLC
- Transformateur
- Multiplicateur de tension
- Résistance de charge
- Potentiomètre réglant la fréquence de l'onduleur

La photo du montage global est présentée dans la Figure 21.

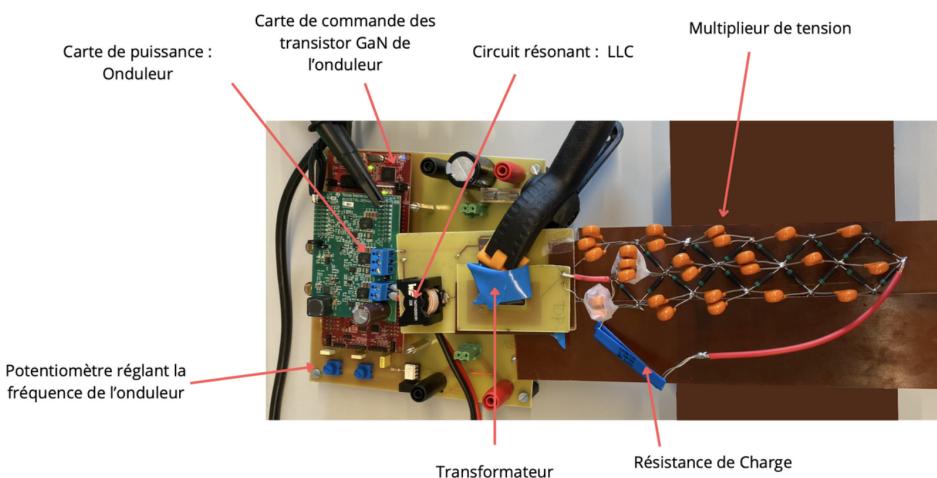


FIGURE 25 – Photo du montage final

Après avoir réglé les commandes des transistors de l'onduleur, nous avons réalisé des tests. Les courbes obtenues lors de ces tests sont présentées ci-dessous.

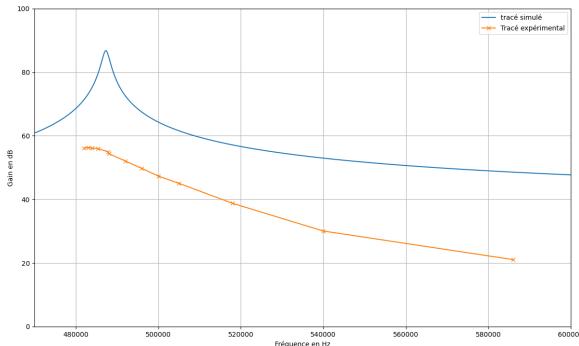


FIGURE 26 – Gain en dB en fonction de la fréquence en Hz pour $V_e = 12V$ (comparaison théorie et expérimentation).

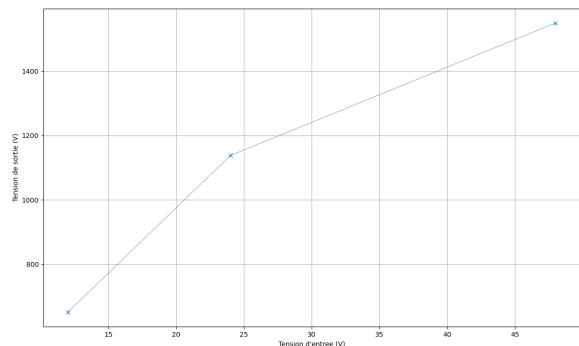


FIGURE 27 – Tension de sortie en V en fonction de la tension d'entrée en V.

Tension d'entrée	Tension de sortie théorique	Tension de sortie expérimentale
48 V	20 000 V	1 550 V

3.5.3 Problème d'inductance

Le seul composant non dimensionné est l'inductance du circuit LLC. Elle doit fonctionner à plus de 400kHz et doit donc être fabriqué à la fois dans un matériau magnétique adéquate et également avec un conducteur pour l'enroulement non sujet à un effet de peau trop important. Trois configuration ont été testées :

- La première est réalisée en fil de litz : le conducteur est lui-même constitué d'un grand nombre de fils isolés entre eux. Ceci limite fortement l'impact de l'effet de peau. Cependant, cette inductance est réalisée dans un matériau magnétique très sujet aux pertes fer (Foucault et hystérésis). On observe donc un emballement thermique de l'inductance autour de la résonance, allant en quelques secondes jusqu'à l'endommagement du composant. Nous observons bien à la caméra thermique la source de chaleur provenant du noyau ferromagnétique.

- La seconde semble posséder un meilleur noyau, mais sans fil de litz. Finalement, le résultat est le même : un emballage thermique autour de la résonance. Cependant, on observe cette fois-ci, à la caméra thermique, que c'est le conducteur qui chauffe.
- Nous avons donc réalisé une dernière inductance en remplaçant le conducteur de la seconde inductance par du fil de litz. Les résultats sont en nette amélioration, mais une étude approfondie du noyau ferromagnétique et de l'enroulement est nécessaire.

3.5.4 Autres composants

Pour ce qui est des autres composants de l'alimentation, certains ne sont pas mises en défaut notamment :

- l'onduleur (tant qu'on ne dépasse ses limites de fonctionnement...)
- le transformateur, il pourrait donc être exploité davantage (ajout de spires au secondaire)
- la capacités de la cellule LLC, on vérifie bien à l'impédance-mètre qu'elle reste capacitive bien au delà de la fréquence d'utilisation (les harmoniques sont donc correctement filtré)

Pour ce qui est du multiplicateur de tension, aucune vérification correcte n'a pu être réalisée en raison de la complexité de trouver une alimentation dont le fonctionnement est parfaitement connu et un outil de mesure permettant d'observer de telles tensions. Cependant, il ne semble pas avoir été mis en défaut. Il reste à vérifier qu'il fournit bien le gain espéré.

3.5.5 Conclusion

Les différentes expériences nous permettent de conclure que l'alimentation haute tension actuelle ne peut pas alimenter efficacement le propulseur ionique, car son gain réel est bien inférieur à celui théoriquement prévu, principalement en raison des pertes dans l'inductance ajoutée au circuit LLC et des performances possiblement non atteintes du multiplicateur de tension. Pour améliorer les performances, un dimensionnement exact de l'inductance du LLC, combiné à un ajout de spires au secondaire du transformateur, permettrait d'obtenir le gain souhaité ; le transformateur n'ayant été mis en défaut dans aucun des essais réalisés. Une étude expérimentale du multiplicateur de tension permettrait également de lever certains doutes. Par ailleurs, l'alimentation haute tension que nous avons réalisée pèse 170 g, contrairement aux 6 kg de l'alimentation haute tension du labo, ce qui respecte le cahier des charges.

Références

- [1] Analytical Model for Electrohydrodynamic Thrust Ravi Sankar Vaddi, Yifei Guan, Alexander Maminshev and Igor Novoselov, University of Washington, Seattle, U.S.A
- [2] Design and implementation of a lightweight high-voltage power converter for electro-aerodynamic propulsion, Institute of Electrical and Electronics Engineers, MIT.
- [3] Force on an Asymmetric Capacitor, Thomas B. Bahder and Christian Fazi, Army Research Laboratory
- [4] Finite Element Analysis Method for Detection of the Corona Discharge Inception Voltage in a Wire-Cylinder Arrangement, Konstantinos Kioussis, Antonios Moronis and Emmanouil D. Fylladitakis, University of West Attica
- [5] Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use, INTERNATIONAL STANDARD, IEC
- [6] A Compact 45 V-to-54 kV Modular DC-DC Converter, Sanghyeon Park, Lei Gu, and Juan Rivas-Davila Department of Electrical Engineering, Stanford University.
- [7] Resonant LLC Converter : Operation and Design, Sam Abdel-Rahman, Infineon Technologies North America.
- [8] Lightweight Design of Magnetic Integrated Transformer for High Voltage Power Supply in Electro-Aerodynamic Propulsion SystemZhenxing Zhao, Jijia Zhu, Yu-Xing Dai, Jun Wang, Senior Member, IEEE, Yachao Yang, Jijia Zhu, Zishun Peng, Student Member, IEEE.
- [9] Thèse : Contribution à la caractérisation et à la modélisation de composants grand gap GaN-Application à un convertisseur en environnement sévère, Lionel HOFFMANN, École Normale Supérieure de Cachan (Paris-Saclay).