

Venturi Lucas

EME 3

Guigo Lucas

Etude et réalisation d'un convertisseur élévateur de tension

SAE Convertisseur DC-DC

BUT GEII

2025/2026

Sommaire

1. Présentation de l'environnement du projet	3
1.1 Projet KHEPRI	3
1.2 Principe et intérêt du convertisseur élévateur de tension.....	4
2. Cahier des charges	5
3. Étude théorique du convertisseur boost	7
3.1 Principe de fonctionnement	7
3.2 Description fonctionnelle.....	7
3.3 Rôles des composants de puissance	9
3.4 Relation tension d'entrée et tension de sortie	9
4. Étude de la partie commande (NE555)	10
4.1 Présentation du NE555	10
4.2 Génération du signal MLI	11
4.3 Rôle des composants de la partie commande.....	11
4.4 Influence du rapport cyclique	12
5. Dimensionnement des composants	12
5.1 Choix de l'inductance	12
5.2 Choix du MOSFET (NMOS)	13
5.3 Choix de la diode	13
5.4 Choix des condensateurs	14
5.5 Choix des résistances	14
6. Simulations	15
6.1 Présentation du montage simulé	15
6.2 Étude du signal de commande et de la tension au drain du MOSFET.....	16
6.3 Tension et courant dans l'inductance L1	16
6.4 Courant et tension sur la résistance de charge R1	17
6.5 Conclusion sur la simulation	17
7. Réalisation pratique.....	17
7.1 Schéma électrique final	17
7.2 Routage	18
7.2.1 Dimensionnement piste de routage.....	18
7.2.2 Routage final.....	22
7.3 Conception de la carte électronique.....	23
7.4 Nomenclature.....	24
7.5 Fabrication et assemblage	25
7.6 Fiche de vérification.....	26
8. Résultat expérimentaux	27
8.1 Mesure tension de sortie et d'entrée.....	27
8.2 Signal de commande	28
8.3 Vérification du fonctionnement	28
8.4 Comparaison théorique et pratique.....	29
8.5 Difficultés rencontrées.....	29
9. Conclusion	30
10. Annexes	31

1. Présentation de l'environnement du projet

1.1 Projet KHEPRI

Dans un contexte de transition énergétique et de recherche de solutions de mobilité plus durable, le secteur aéronautique explore de nouvelles approches visant à réduire son impact environnemental. C'est dans cette optique qu'a été lancé le projet KHEPRI, un projet collaboratif, centré sur la conception et la réalisation d'un planeur à motorisation électrique d'appoint alimentée par énergie photovoltaïque.

Le projet KHEPRI repose sur un partenariat entre l'École de l'air et de l'espace de Salon-de-Provence et l'IUT de Salon-de-Provence, dans le cadre de la formation BUT Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII). Cette collaboration permet de mobiliser des compétences complémentaires autour d'un objectif commun qui est de concevoir un planeur innovant intégrant des technologies actuelles en matière d'aéronautique et d'énergies renouvelables.

La répartition des tâches s'organise de la manière suivante : l'École de l'air et de l'espace est en charge de la conception et de la réalisation de la maquette mécanique, correspondant à la structure et à l'architecture de l'avion, tandis que les étudiants du BUT GEII assurent le développement de l'ensemble des systèmes électriques, électroniques et d'alimentation, incluant la motorisation électrique et l'exploitation de l'énergie photovoltaïque.

Afin de mieux comprendre l'architecture du système et les interactions entre ses différents éléments, un synoptique global du montage est présenté ci-dessous.

Ce schéma permet de visualiser les flux d'énergie ainsi que les échanges d'informations entre les différents blocs fonctionnels, depuis la production de l'énergie jusqu'au pilotage des actionneurs. Il constitue une vue d'ensemble du système avant d'entrer dans l'étude détaillée de chaque sous-ensemble.

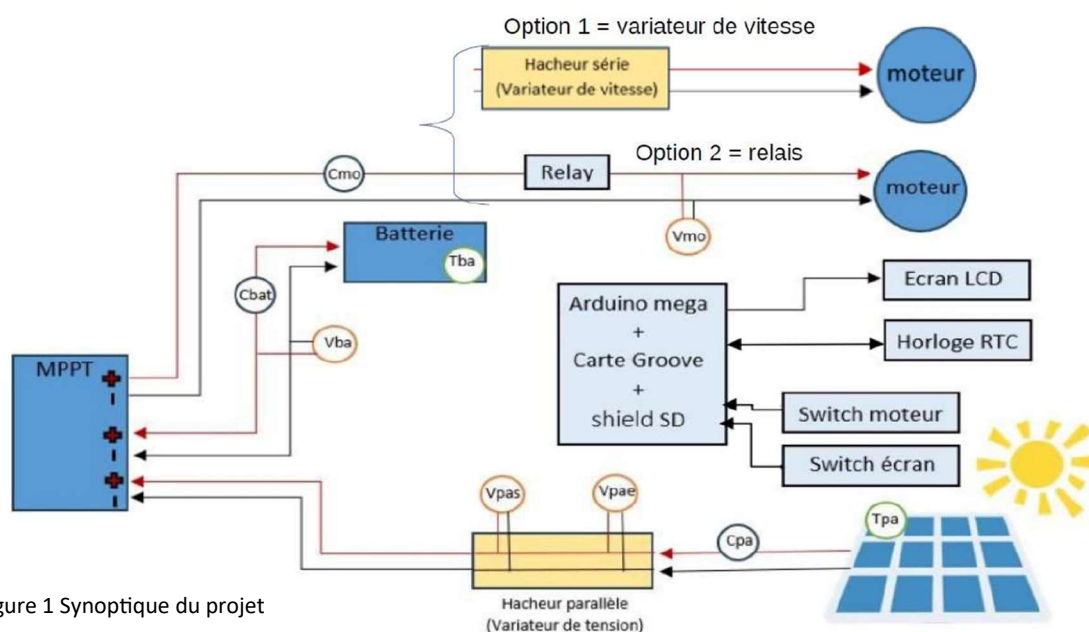


Figure 1 Synoptique du projet

Les panneaux photovoltaïques constituent la source principale d'énergie du système. Ils convertissent l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de courant continu. La tension et le courant produits varient en fonction de l'ensoleillement et des conditions environnementales, ce qui nécessite une gestion adaptée de l'énergie en sortie.

La batterie assure le stockage de l'énergie électrique produite par les panneaux. Elle permet d'alimenter le système lorsque la production solaire est insuffisante, de stabiliser l'alimentation des différents blocs et d'assurer une continuité de fonctionnement.

Le régulateur MPPT optimise le transfert d'énergie entre les panneaux photovoltaïques et la batterie. Son rôle est de faire fonctionner les panneaux à leur point de puissance maximale, quelles que soient les conditions d'ensoleillement, afin d'améliorer le rendement global du système.

L'Arduino Mega assure la lecture des capteurs de tension et de courant, le traitement des données, la prise de décision pour le pilotage du moteur, la communication avec les interfaces utilisateur.

La carte Grove facilite les connexions des capteurs et des périphériques, tandis que le Shield SD permet l'enregistrement des données.

L'écran LCD permet l'affichage en temps réel des tensions, courants, états de fonctionnement, modes sélectionnés.

L'horloge RTC permet de disposer d'une référence temporelle précise, indépendante de l'alimentation principale, utilisée pour dater les mesures enregistrées sur la carte SD et gérer des fonctions dépendantes du temps.

Les interrupteurs permettent une activation ou désactivation du moteur ou de l'écran.

1.2 Principe et intérêt du convertisseur élévateur de tension

Dans le cadre de ce projet, un convertisseur élévateur de tension est placé en sortie des panneaux photovoltaïques, ou du hacheur parallèle associé, avant l'entrée du régulateur MPPT.

Les panneaux photovoltaïques fournissent une tension continue qui varie en fonction de l'ensoleillement, la météo et d'autres facteurs. Ainsi, la tension délivrée par les panneaux peut être insuffisante et le régulateur MPPT, la batterie ou le moteur ont besoin d'une tension minimale pour fonctionner correctement.

Un branchement direct des panneaux photovoltaïques au régulateur MPPT peut entraîner le non fonctionnement du régulateur MPPT ou la mise en sécurité suite à une tension d'entrée insuffisante. Les panneaux ne fonctionnent pas tout le temps à leur point de puissance maximale entraînant une perte de rendement et une instabilité du système. Ces contraintes justifient donc l'ajout d'un élévateur de tension.

Le convertisseur élévateur de tension permet de résoudre ces contraintes en augmentant et adaptant la tension fournie par les panneaux pour qu'elles soient compatibles avec les exigences du système.

Le convertisseur élévateur de tension est constitué d'une inductance, d'un MOSFET, d'une diode, d'un condensateur, d'un circuit de commande en modulation de largeur d'impulsion. Son schéma de principe est le suivant :

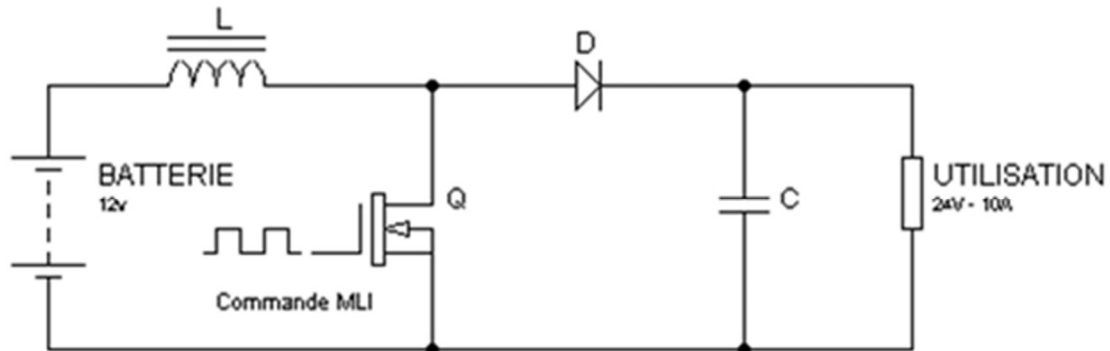


Figure 2 schéma d'un convertisseur boost

Son fonctionnement se décompose en deux phases, lorsque le MOSFET est fermé, un courant traverse l'inductance, qui emmagasine de l'énergie sous forme de champ magnétique et lorsque le MOSFET est ouvert, l'inductance restitue l'énergie stockée en s'opposant à la variation de courant, ce qui provoque une élévation de la tension en sortie.

Dans ce projet, l'intégration d'un convertisseur élévateur de tension permet d'assurer la compatibilité entre les panneaux photovoltaïques et le régulateur MPPT, d'améliorer la fiabilité et la stabilité du système, de garantir le fonctionnement du système même en conditions d'ensoleillement défavorables. Le convertisseur doit également présenter un rendement élevé afin de limiter les pertes énergétiques, ce qui constitue une contrainte importante dans un système embarqué alimenté par énergie photovoltaïque.

2. Cahier des charges

Dans le cadre de ce projet, un cahier des charges a été établi afin de définir les besoins à satisfaire et les contraintes à respecter. Il permet de structurer la démarche de conception et de justifier les choix techniques effectués par la suite.

Le tableau ci-dessous présente le cahier des charges fonctionnel du système précisant les fonctions attendues, les critères de performance et les niveaux associés.

- Réaliser un convertisseur DC-DC élévateur de tension
- Tension d'entrée 12V
- Tension de sortie 24V
- Tension de sortie réglable et stabilisée
- Intégration de bornes de test

- Protection du convertisseur

Le cahier des charges permet d'exprimer le besoin de manière globale, mais ne suffit pas à lui seul pour mener une conception détaillée. Il faut donc le traduire en spécifications opérationnelles, fonctionnelles et techniques. Ces spécifications assurent le lien entre les besoins et les solutions et servent de référence pour le dimensionnement, la mise en œuvre et la validation du système.

Les spécifications fonctionnelles décrivent les fonctions que le système doit assurer afin de répondre au besoin exprimé dans le cahier des charges.

Dans le cadre de ce projet, le convertisseur boost doit alimenter la maquette 25 %, adapter la tension d'entrée issue des panneaux photovoltaïques afin de la rendre compatible avec les équipements de la maquette et fournir une tension de sortie stable, quelles que soient les variations de la tension d'entrée ou de la charge.

Ces fonctions constituent définissent le rôle principal du système mais ces fonctions ne précisent pas encore dans quelles conditions le système doit fonctionner. Cette dimension est apportée par les spécifications opérationnelles.

Les spécifications opérationnelles précisent les conditions d'utilisation et de fonctionnement du système. Elles permettent de s'assurer que le système reste opérationnel dans un environnement donné.

Le convertisseur boost doit fonctionner avec une tension d'entrée de 12 V, fonctionner avec une charge moteur variable, impliquant des variations de courant et de puissance, être commandé par un signal MLI, permettant le contrôle de la tension de sortie et garantir la sécurité des utilisateurs, notamment par la limitation des risques électriques.

Ces spécifications définissent le cadre réel d'exploitation du système et imposent des contraintes fortes sur sa conception. Pour répondre à ces exigences fonctionnelles et opérationnelles, il est nécessaire de faire des choix concrets concernant les composants et l'architecture du système, ce qui conduit aux spécifications technologiques.

Les spécifications technologiques traduisent les exigences précédentes en choix techniques précis, permettant la réalisation effective du système.

Afin de satisfaire les spécifications fonctionnelles et opérationnelles, le montage sera constitué d'un transistor de puissance de type MOSFET, adapté aux applications de conversion DC-DC et capable de supporter les courants nécessaires, d'une commande par modulation de largeur d'impulsion, permettant de contrôler la tension de sortie du convertisseur et de dispositifs de protection, tels que des protections contre les surintensités ou les surtensions, afin d'assurer la fiabilité du système et la sécurité des utilisateurs.

Ces choix technologiques permettent de répondre aux performances attendues tout en respectant les contraintes de fonctionnement et de sécurité imposées par le cahier des charges.

L'ensemble des spécifications fonctionnelles, opérationnelles et technologiques assure une continuité logique entre le besoin exprimé dans le cahier des charges et les solutions techniques mises en œuvre, ce qui garantit la cohérence avec le système conçu.

3. Étude théorique du convertisseur boost

3.1 Principe de fonctionnement

Le convertisseur Boost est un convertisseur continu-continu permettant d'élever une tension continue d'entrée vers une tension continue de valeur supérieure. Il est largement utilisé dans les applications nécessitant une adaptation de tension, comme les alimentations à découpage, les systèmes embarqués ou les dispositifs alimentés par batterie.

Le principe de fonctionnement repose sur le stockage d'énergie dans une inductance, puis sur sa restitution vers la charge à une tension plus élevée. Ce fonctionnement est assuré grâce à un MOSFET, une diode de redressement, une inductance et un condensateur de filtrage en sortie.

Le convertisseur fonctionne en régime de découpage où le MOSFET est commandé périodiquement à une fréquence élevée selon un signal de commande. Durant une première phase, l'interrupteur est fermé et l'énergie est stockée dans l'inductance. Durant une seconde phase, l'interrupteur est ouvert, l'énergie stockée est transférée vers la charge à travers la diode, ce qui permet d'obtenir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

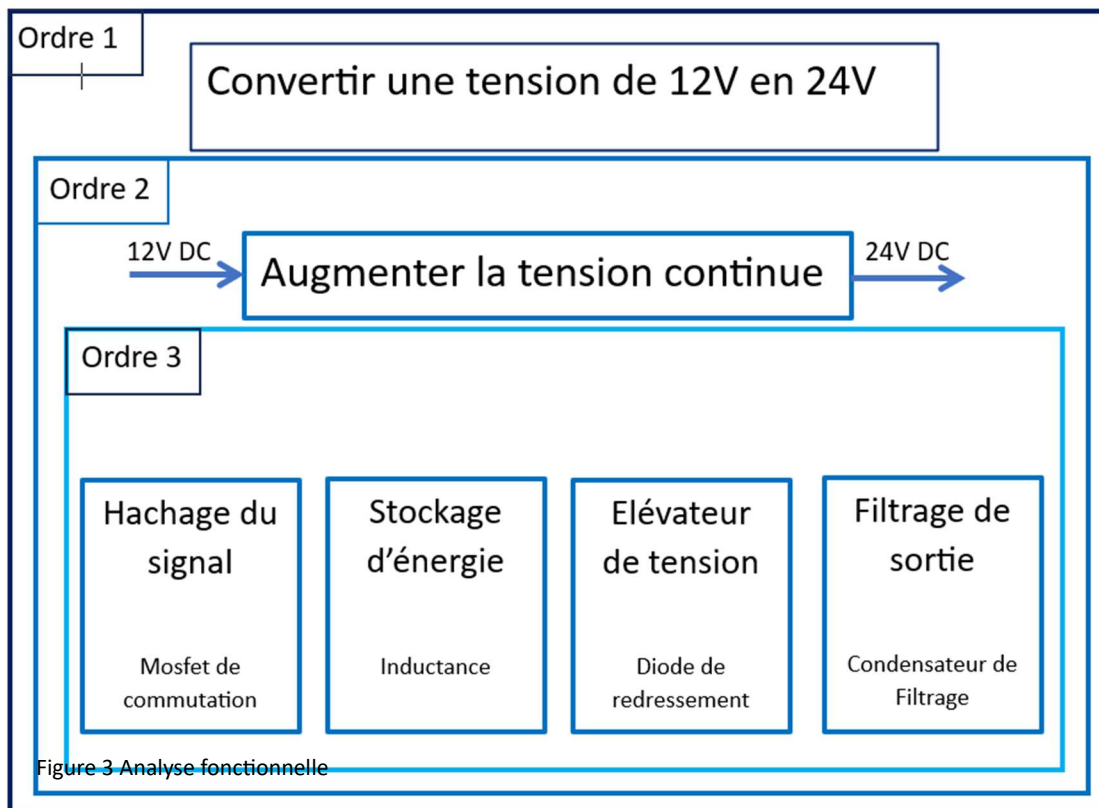
Ce système permet ainsi de contrôler la valeur de la tension de sortie en agissant sur le rapport cyclique du signal de commande.

3.2 Description fonctionnelle

Avant de détailler les composants et les équations du convertisseur, il faut réaliser une analyse fonctionnelle afin d'identifier clairement les fonctions principales et secondaires du système.

L'analyse fonctionnelle permet de décomposer le fonctionnement global du convertisseur en plusieurs sous-fonctions assurées par différents blocs fonctionnels. Elle facilite la compréhension du rôle de chaque partie du montage et met en évidence l'organisation interne du système.

La figure ci-dessous présente l'analyse fonctionnelle du convertisseur Boost réalisé dans ce projet.



L'analyse fonctionnelle est organisée selon trois niveaux hiérarchiques.

Au premier niveau, la fonction principale du système est de convertir une tension continue de 12 V en une tension continue de 24 V. Il s'agit de la fonction globale du convertisseur.

Au second niveau, cette fonction principale est reformulée sous la forme d'une fonction technique qui est d'augmenter une tension continue. Le système reçoit en entrée une tension de 12 V continu et fournit en sortie une tension de 24 V continu.

Au troisième niveau, la fonction globale est décomposée en plusieurs sous-fonctions techniques qui sont :

- la fonction de hachage du signal, assurée par le MOSFET de commutation, qui permet de découper la tension d'entrée selon un signal de commande.
- La fonction de stockage d'énergie, assurée par l'inductance, qui emmagasine l'énergie lorsque l'interrupteur est fermé.
- La fonction d'élévation de tension, assurée par la diode de redressement, qui permet le transfert de l'énergie vers la sortie lorsque l'interrupteur est ouvert.
- La fonction de filtrage de sortie, assurée par le condensateur, qui permet de lisser la tension de sortie afin d'obtenir une tension continue stable.

Cette analyse fonctionnelle met en évidence le rôle de chaque sous-ensemble.

3.3 Rôles des composants de puissance

Le convertisseur Boost est constitué de plusieurs composants de puissance dont chacun joue un rôle spécifique dans le fonctionnement global du système.

L'inductance est un élément central du convertisseur Boost. Son rôle est de stocker de l'énergie sous forme de champ magnétique lorsque l'interrupteur est fermé. Lorsque celui-ci s'ouvre, l'énergie emmagasinée est restituée vers la charge, contribuant ainsi à l'augmentation de la tension de sortie.

Le MOSFET joue le rôle d'interrupteur électronique commandé. Il est piloté par un signal de commande périodique qui définit les phases de stockage et de restitution de l'énergie. La durée de conduction du MOSFET, caractérisée par le rapport cyclique, permet de contrôler la valeur de la tension de sortie.

La diode permet d'orienter le courant vers la sortie lorsque le MOSFET est bloqué. Elle empêche également le retour du courant de la charge vers la source d'entrée. Elle est indispensable pour assurer un transfert correct de l'énergie vers la charge.

Le condensateur est utilisé pour filtrer la tension de sortie. Il permet de réduire les ondulations dues au fonctionnement en découpage et de fournir une tension continue stable à la charge.

L'ensemble de ces composants permet d'assurer un fonctionnement efficace et contrôlé du convertisseur Boost.

3.4 Relation tension d'entrée et tension de sortie

Dans le cas idéal, en négligeant les pertes et en supposant un fonctionnement en régime continu, la relation entre la tension d'entrée $V_{entrée}$ et la tension de sortie V_{sortie} du convertisseur Boost est donnée par l'expression suivante :

$$V_{sortie} = \frac{V_{entrée}}{1 - a}$$

Où a représente le rapport cyclique du signal de commande appliqué au MOSFET.

Cette relation montre que la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée tant que le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. Plus le rapport cyclique augmente, plus la tension de sortie augmente.

Dans le cadre de ce projet, pour obtenir une tension de sortie de 24 V à partir d'une tension d'entrée de 12 V, il est nécessaire de choisir un rapport cyclique théorique de :

$$24V = \frac{12V}{1-a} \text{ Donc } a = 50\%$$

Donc un rapport cyclique de 50 % permet idéalement de doubler la tension d'entrée.

En pratique, les pertes dans les composants entraînent une légère différence entre la valeur théorique et la valeur réelle de la tension de sortie.

Cette relation est valable dans un modèle idéal. En pratique, les pertes dans les composants comme la résistance de l'inductance, la chute de tension de la diode, les pertes de commutation du MOSFET entraînent une diminution du rendement et un écart entre la valeur théorique et réelle.

4. Étude de la partie commande (NE555)

4.1 Présentation du NE555

Le circuit intégré NE555 est un temporisateur, utilisé pour la génération de signaux périodiques, de temporisations ou de signaux MLI. Il intègre principalement deux comparateurs, un bascule RS et un transistor de décharge.

Dans le mode astable, le NE555 fonctionne comme un oscillateur, il charge et décharge périodiquement un condensateur à travers un réseau de résistances, ce qui permet de produire un signal carré en sortie (broche 3).

Ce signal est particulièrement adapté pour la commande des convertisseurs à découpage, car il permet de contrôler précisément les durées de conduction et de blocage de l'interrupteur électronique.

Dans notre projet, le NE555 est alimenté par la tension d'entrée et fournit un signal MLI destiné à piloter la grille du MOSFET.

Le schéma du NE555 est le suivant :

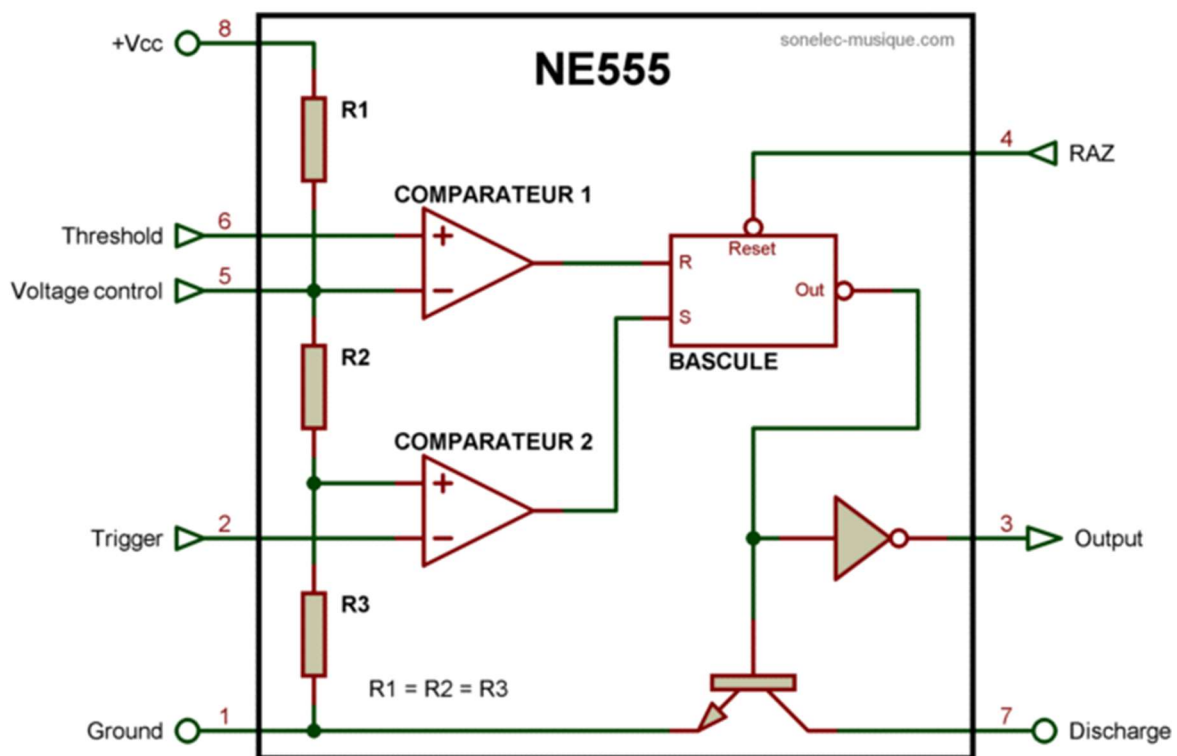


Figure 4 Schéma du NE555

4.2 Génération du signal MLI

Le NE555 est câblé en mode astable afin de générer un signal périodique de fréquence fixe et de rapport cyclique réglable.

Le principe repose sur la charge et la décharge d'un condensateur à travers les résistances et les diodes associées.

Lorsque la tension aux bornes du condensateur atteint le seuil supérieur qui est $2/3$ de la tension d'alimentation, le comparateur interne bascule l'état de la sortie et active le transistor de décharge. Le condensateur se décharge alors jusqu'au seuil inférieur qui est $1/3$ de la tension d'alimentation. Une fois ce seuil atteint, la sortie rebascule et un nouveau cycle commence.

Grâce à l'utilisation de deux diodes et d'un potentiomètre, les temps de charge et de décharge peuvent être rendus différents, ce qui permet de modifier le rapport cyclique du signal tout en conservant une fréquence pratiquement constante.

Le signal obtenu en sortie du NE555 est un signal carré de type MLI, appliqué ensuite à la grille du MOSFET via une résistance de limitation.

4.3 Rôle des composants de la partie commande

La partie commande est modélisée par le schéma ci-dessous :

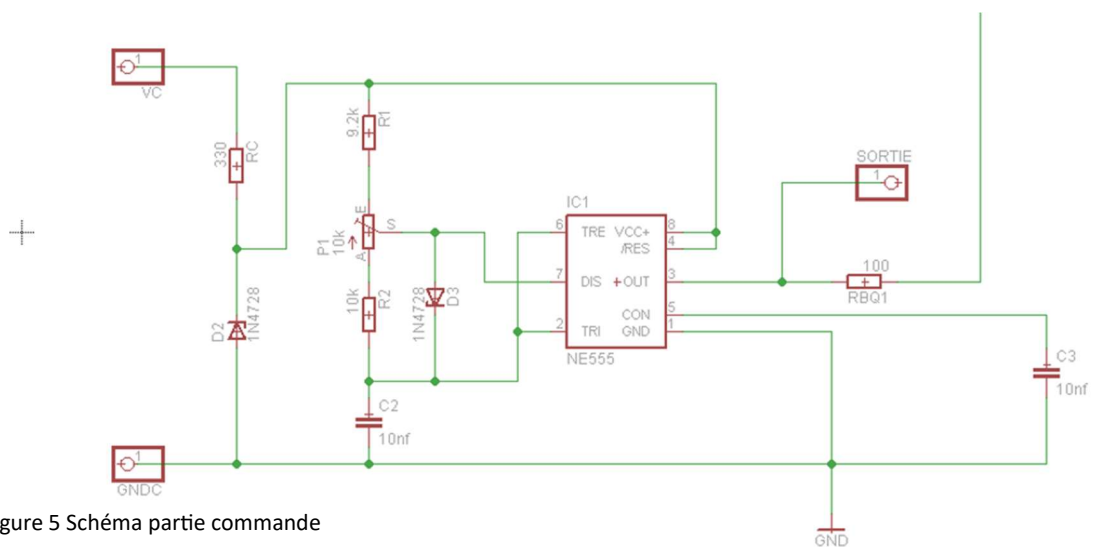


Figure 5 Schéma partie commande

Chaque composant de la partie commande joue un rôle précis dans la génération et la mise en forme du signal MLI, le NE555 assure la génération du signal périodique et la commutation entre les phases de charge et de décharge du condensateur. Le condensateur C2 détermine, avec les résistances associées, la période d'oscillation du signal. Les résistances et le potentiomètre permettent d'ajuster les temps de charge et de décharge du condensateur, donc de régler le rapport cyclique.

Les diodes imposent des chemins de courant différents lors de la charge et de la décharge, ce qui autorise un réglage indépendant du rapport cyclique. La résistance RBQ1 en série avec la sortie limite le courant vers la grille du MOSFET et protège la sortie du NE555. Le condensateur C3 assure le filtrage de l'alimentation du circuit et améliore la stabilité du fonctionnement.

Ainsi, l'ensemble de ces composants permet d'obtenir un signal MLI stable, réglable et adapté à la commande du MOSFET.

4.4 Influence du rapport cyclique

Dans un convertisseur boost, le rapport cyclique du signal de commande joue un rôle fondamental dans la détermination de la tension de sortie. Lorsque le MOSFET est conducteur, l'inductance emmagasine de l'énergie. Lorsqu'il est bloqué, cette énergie est transférée vers la charge à travers la diode, ce qui élève la tension de sortie.

L'augmentation du rapport cyclique entraîne une augmentation du temps de conduction du MOSFET, ce qui permet de stocker davantage d'énergie dans l'inductance et donc d'augmenter la tension de sortie. Inversement, une diminution du rapport cyclique réduit l'énergie transférée et abaisse la tension de sortie.

Le réglage du potentiomètre permet ainsi de contrôler directement la tension de sortie du convertisseur en agissant sur le rapport cyclique du signal MLI généré par le NE555.

5. Dimensionnement des composants

5.1 Choix de l'inductance

L'inductance est un composant essentiel du convertisseur boost, car elle permet de stocker de l'énergie lorsque le transistor est fermé, puis de la restituer vers la sortie lorsque le transistor est ouvert.

On a un rapport cyclique de 50 %. Afin d'avoir un fonctionnement stable et de limiter les pertes, on choisit une ondulation de courant dans l'inductance de 20 % du courant d'entrée.

Le courant d'entrée étant de 3 A, l'ondulation vaut :

$$\Delta I_{L1} = 20\% * I_{L1} = 0.2 * 3 = 0.6 \text{ A}$$

La valeur de l'inductance est alors calculée avec la formule suivante

$$L_1 = \frac{V_{\text{entrée}} * a}{\Delta I_{L1} * f} = \frac{12 * 0.5}{0.6 * 50\,000} = 200 \mu\text{H}$$

On choisit ensuite une valeur normalisée qui est de 220 μH

5.2 Choix du MOSFET (NMOS)

Le MOSFET est utilisé comme interrupteur électronique commandé par le signal MLI généré par le NE555. Il doit supporter à la fois la tension et le courant du montage.

Le MOSFET choisi est un IRFZ48Z. Ce choix est justifié par plusieurs critères, il supporte une tension drain-source largement supérieure à la tension maximale du montage 24 V, il peut supporter un courant élevé, compatible avec le courant circulant dans l'inductance. Sa résistance lorsqu'il est fermé est faible ce qui limite les pertes par effet Joule et il est facile à commander avec une tension de grille issue d'un NE555. Le choix du MOSFET prend également en compte la fréquence de commutation afin de limiter les pertes de commutation et améliorer le rendement global du convertisseur.

Le MOSFET est caractérisé par le schéma ci-dessous :

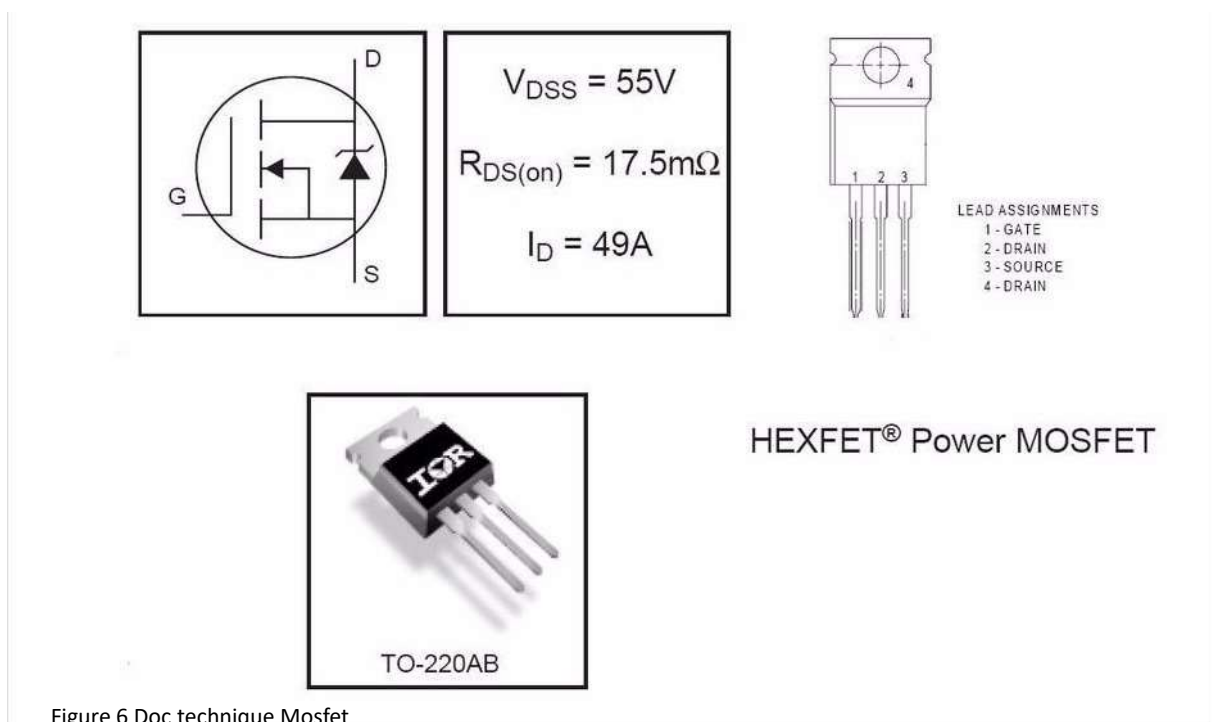


Figure 6 Doc technique Mosfet

5.3 Choix de la diode

La diode est utilisée comme diode de roue libre dans le convertisseur boost. Elle conduit lorsque le MOSFET est ouvert et permet de transférer l'énergie stockée dans l'inductance vers la sortie.

La diode choisie est une 1N4004, elle supporte une tension inverse suffisante pour une sortie à 24 V, elle peut conduire le courant de sortie du convertisseur.

Une diode Schottky aurait été plus adaptée car elle présente une chute de tension plus faible et des temps de commutation plus rapides, ce qui permettrait d'améliorer le rendement du convertisseur.

5.4 Choix des condensateurs

Les condensateurs présents dans le montage permettent le stockage d'énergie, le filtrage et la stabilité du fonctionnement du NE555.

Le condensateur connecté aux broches TRIG et THRESH du NE555 permet de définir la période du signal MLI. Sa valeur est choisie en fonction des résistances associées et de la fréquence souhaitée qui est de 50 kHz. Une valeur de l'ordre de 10 nF permet d'obtenir une fréquence élevée tout en conservant des résistances de valeur raisonnable. Ce choix évite des résistances trop faibles et un courant trop élevé ou des résistances trop grandes qui seraient plus sensibles au bruit.

Un condensateur de 10 nF est placé entre l'alimentation et la masse du NE555. Il sert à filtrer les parasites haute fréquence, stabiliser la tension d'alimentation du circuit intégré et éviter les déclenchements intempestifs du NE555.

Le condensateur de sortie permet de réduire l'ondulation de tension et de stabiliser la tension de sortie à 24 V.

La puissance d'entrée vaut

$$P_{\text{entrée}} = V_{\text{entrée}} * I_{\text{entrée}} = 12 * 3 = 36W$$

On suppose un convertisseur idéal, Un convertisseur DC-DC ne crée pas de puissance, il la transfère.

Donc $P_{\text{entrée}} = P_{\text{sortie}}$

$$I_{\text{sortie}} = \frac{P_{\text{sortie}}}{V_{\text{sortie}}} = \frac{36}{24} = 1.5 A$$

Ondulation max acceptable $\Delta V = 0.05V$, la capacité minimale est alors donnée par

$$C_1 = \frac{I_{\text{sortie}} * a}{\Delta V * f} = \frac{1.5 * 0.5}{0.05 * 50\,000} = 300 \mu F$$

On choisit donc une valeur normalisée de 470 μF

5.5 Choix des résistances

Les résistances présentes dans le montage ont plusieurs fonctions qui sont la fixation de la fréquence et du rapport cyclique du NE555, la limitation de courant, la polarisation et la protection des composants.

Le circuit NE555 est utilisé en mode astable afin de générer un signal MLI qui commande le MOSFET. La fréquence et le rapport cyclique dépendent des résistances et du condensateur connectés aux broches TRIG, THRESH et DISCH. Les résistances R1, R2 et le potentiomètre permettent de fixer la fréquence de fonctionnement autour de 50 kHz et d'ajuster le rapport cyclique donc la tension de sortie du convertisseur boost. Le potentiomètre permet d'avoir un réglage fin du rapport cyclique, ce qui est très utile pour compenser les pertes réelles du montage et ajuster précisément la tension de sortie à 24 V. Les valeurs choisies sont suffisamment élevées pour limiter le courant dans le NE555,

éviter une consommation inutile et rester compatibles avec la fréquence de fonctionnement souhaitée.

Une résistance est placée entre la sortie du NE555 et la grille du MOSFET. Cette résistance permet de limiter le courant de charge et de décharge de la capacité de grille du MOSFET, d'éviter les oscillations parasites et de protéger la sortie du NE555. Une valeur de l'ordre d'une centaine d'ohms est suffisante pour assurer une commande propre du MOSFET sans ralentir la commutation.

Une résistance de rappel à la masse est utilisée sur la grille du MOSFET. Elle permet de garantir que le MOSFET reste bloqué lorsque le signal de commande est absent et d'éviter une mise en conduction involontaire au démarrage. La valeur est choisie suffisamment élevée pour ne pas consommer de courant inutile, tout en assurant un état logique bien défini.

6. Simulations

6.1 Présentation du montage simulé

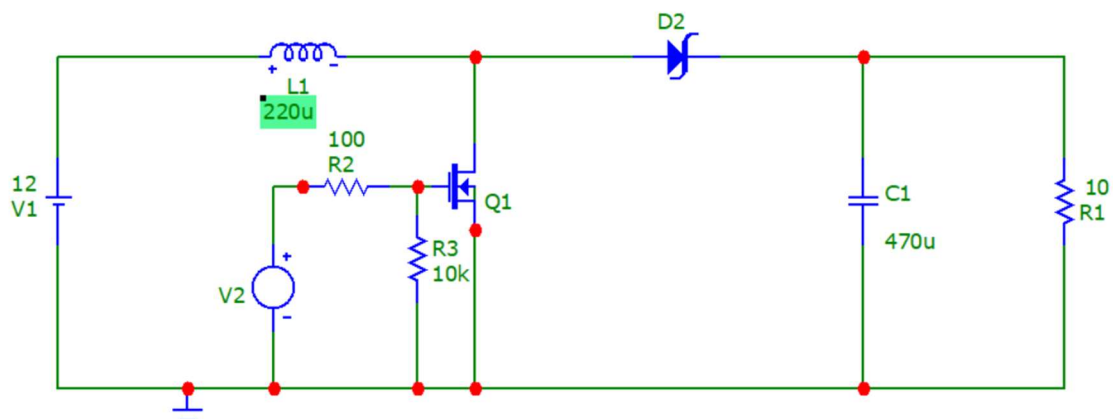


Figure 7 Schéma de simulation

Afin de valider le fonctionnement du montage avant la réalisation pratique, une simulation a été réalisée à l'aide du logiciel Micro-Cap. Le montage simulé est un convertisseur à découpage commandé par un MOSFET Q1. La commande du transistor est assurée par une source de tension V2, représentant le signal de commande. Le circuit est constitué d'une inductance L1, d'une diode D2, d'un condensateur de filtrage C1 et d'une résistance de charge R1. La tension d'entrée est fixée à 12 V.

6.2 Étude du signal de commande et de la tension au drain du MOSFET

La figure ci-dessous représente le signal de commande V2 appliqué à la grille du MOSFET Q1 qui est en bleu ainsi que la tension au drain de Q1 qui est en rouge.

Le signal de commande V2 est un signal périodique carré, qui permet d'ouvrir et de fermer le MOSFET à une fréquence donnée. Lorsque V2 est à l'état haut, le MOSFET est fermé donc la tension au drain est nulle puisqu'il est relié à la masse, ce qui permet le stockage de l'énergie dans l'inductance L1. À l'inverse, lorsque V2 est à l'état bas, le MOSFET est ouvert donc la tension au drain augmente fortement, ce qui correspond à la phase de restitution de l'énergie stockée dans l'inductance vers la charge via la diode D2.

Cette courbe montre le fonctionnement en commutation du MOSFET.

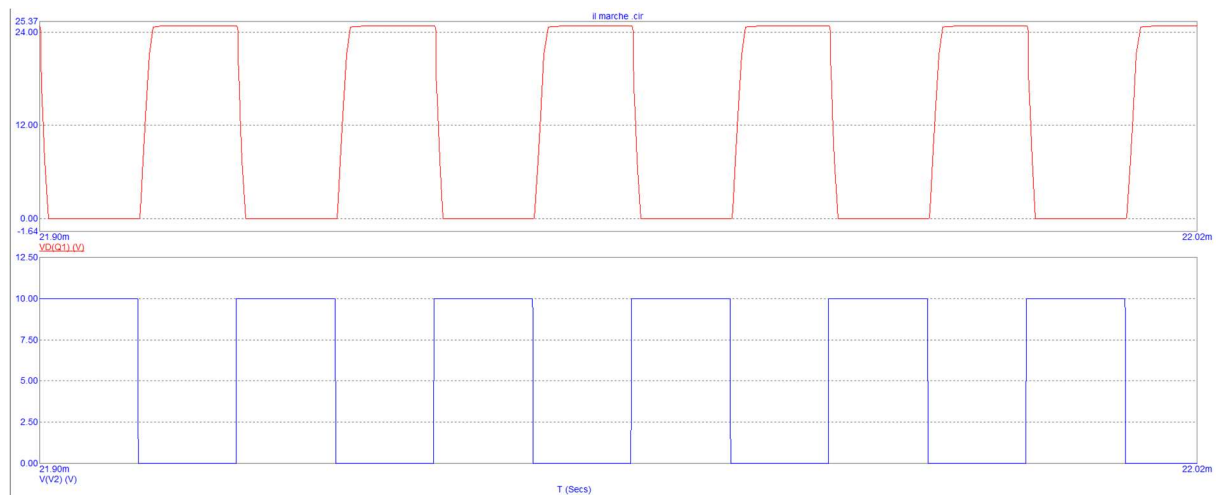


Figure 8 Commutation Mosfet

6.3 Tension et courant dans l'inductance L1

La figure suivante montre l'évolution de la tension aux bornes de l'inductance L1 qui est en bleu ainsi que le courant traversant L1 qui est en rouge. Pendant la conduction du MOSFET, le courant dans L1 augmente linéairement car l'inductance emmagasine de l'énergie. Lorsque le MOSFET s'ouvre, le courant diminue progressivement, l'énergie étant transférée vers la charge à travers la diode.

La tension aux bornes de l'inductance alterne entre deux niveaux en fonction de l'état du MOSFET.

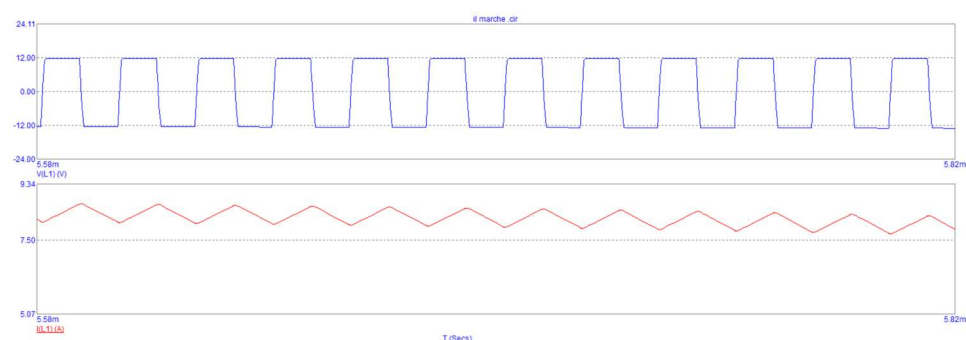


Figure 9 Tension et intensité de l'inductance

6.4 Courant et tension sur la résistance de charge R1

La dernière figure présente la tension aux bornes de la résistance de charge R1, VR1 ainsi que le courant la traversant IR1. On constate que la tension de sortie atteint une valeur d'environ 24 V, ce qui est supérieure à la tension d'entrée de 12 V. Cela montre que le montage fonctionne bien comme un convertisseur élévateur. Le courant dans la résistance R1 atteint une valeur maximale d'environ 1,6 A, puis se stabilise après le régime transitoire. Le filtrage assuré par le condensateur C1 permet d'obtenir une tension stable en sortie, malgré le fonctionnement en découpage du montage.

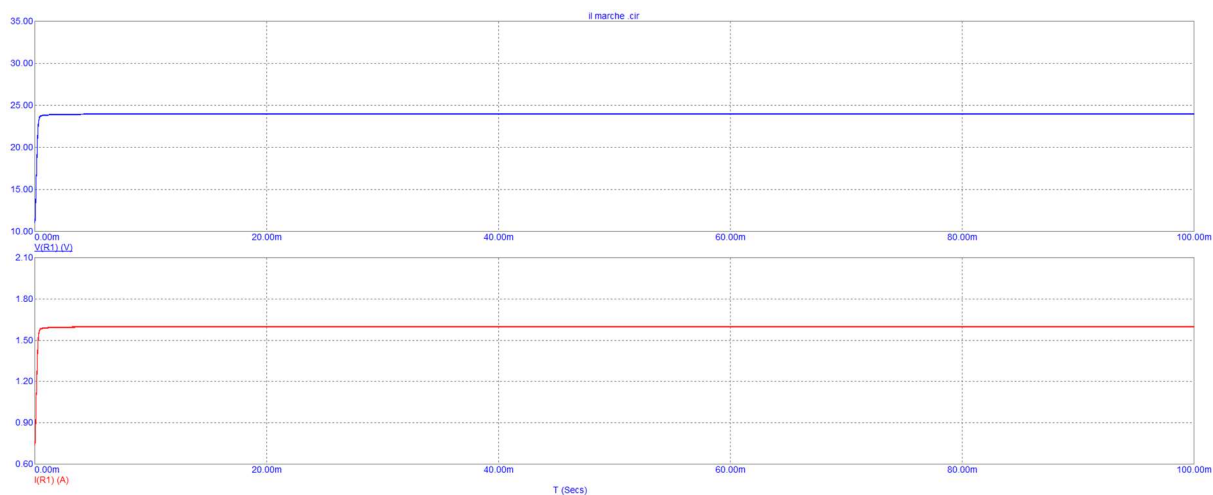


Figure 10 Tension et Intensité de la charge

6.5 Conclusion sur la simulation

Les résultats obtenus par simulation sont conformes au fonctionnement théorique attendu. Les différentes courbes permettent de bien visualiser les phases de conduction et de blocage du MOSFET, le comportement de l'inductance ainsi que la tension et le courant délivrés à la charge. La simulation sous Micro-Cap a donc permis de valider le dimensionnement et le principe de fonctionnement du montage avant sa mise en œuvre réelle.

7. Réalisation pratique

7.1 Schéma électrique final

Dans cette partie, nous présentons le schéma électrique final du convertisseur élévateur réalisé à l'aide du logiciel EAGLE. Ce schéma constitue l'aboutissement de la phase de conception, après le dimensionnement des composants et la validation du fonctionnement par simulation.

Le schéma regroupe l'ensemble des blocs fonctionnels étudiés précédemment, à savoir la partie puissance avec l'inductance, la diode, les condensateurs et le MOSFET, la partie commande basée sur le circuit intégré NE555, ainsi que les circuits de filtrage et de protection. Chaque composant a été choisi en cohérence avec les calculs théoriques et les résultats de simulation obtenus sous Micro-Cap.

Le schéma électrique final est présenté ci-dessous :

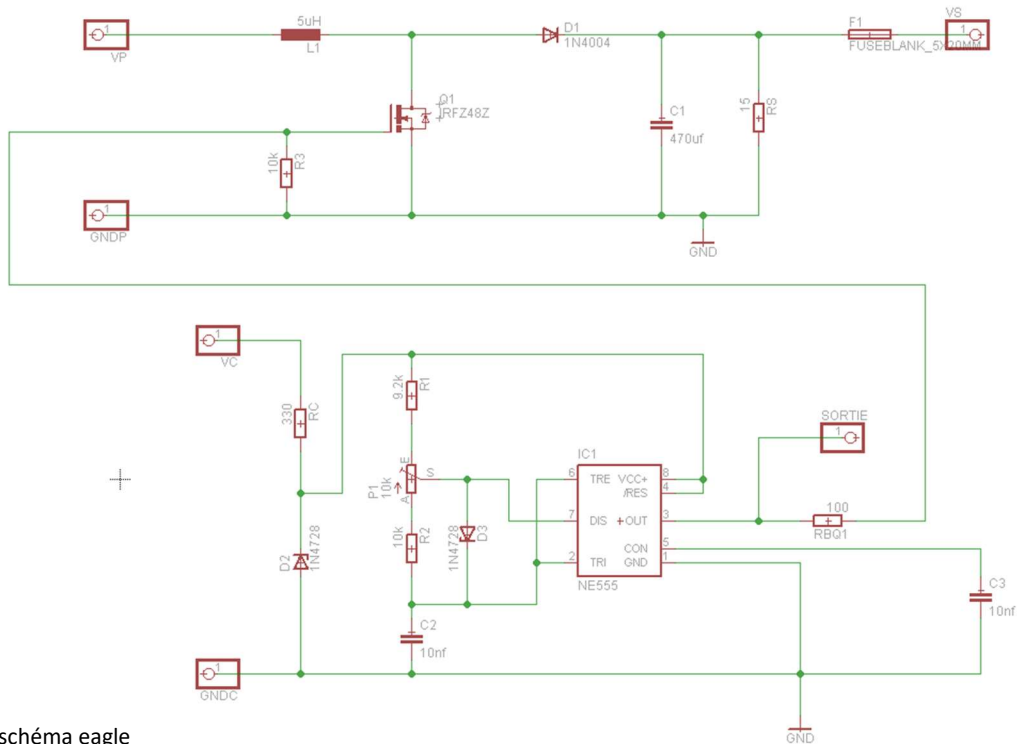


Figure 11 schéma eagle

7.2 Routage

7.2.1 Dimensionnement piste de routage

Dans le cadre de la conception du circuit imprimé, une grande importance a été portée au dimensionnement des pistes afin de garantir la tenue en courant et de limiter les échauffements. Ce dimensionnement a été réalisé à l'aide du site [Calculateur de largeur de piste de circuit imprimé | DigiKey](#) qui est un outil de calcul dédié, basé sur les recommandations de la norme IPC-2221.

Le courant maximal circulant dans les parties puissances et commandes du convertisseur ont été estimé à partir des caractéristiques du système et de l'outil de simulation Micro-cap.

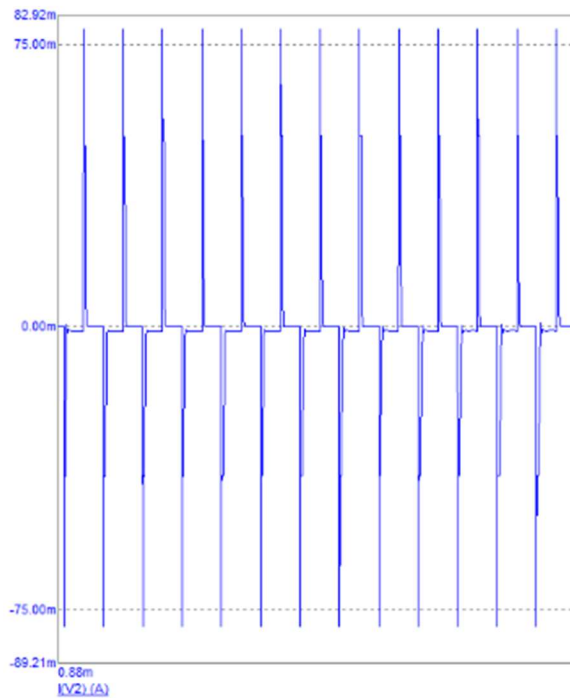


Figure 12 Intensité partie commande

En fonction de cette intensité, la largeur minimale des pistes a été déterminée afin d'éviter toute surchauffe pouvant dégrader les performances ou endommager le circuit.

Les pistes de la partie puissance notamment autour de l'inductance, de la diode et du MOSFET ont ainsi été dimensionnées avec une largeur supérieure à celle strictement nécessaire, afin d'introduire une marge de sécurité et de limiter les pertes par effet Joule.

COURANT (I)

3

A

ÉPAISSEUR (T)

75

µm

AUGMENTATION DE TEMPÉRATURE (T_{amb})

2

°C

AMBIENT TEMPERATURE

25

°C

LONGUEUR DE PISTE

2

po

FORMULE

Calculez d'abord la surface :

$$A = \left(\frac{I}{k \times T_{Rise} \times b} \right)^2$$

Puis calculez la largeur :

$$W = \frac{A}{t \times 1.378}$$

Pour couches internes IPC-2221 : k = 0.024, b = 0.44, c = 0.725

Pour couches externes IPC-2221 : k = 0.048, b = 0.44, c = 0.725

où k, b et c sont les constantes résultant de l'ajustement de la courbe aux courbes IPC-2221.

Valeurs courantes :

Épaisseur : 1 oz

Température ambiante : 25 C

Augmentation de la température : 10 C

Largueur de piste minimum

4.407595963 mm

Largueur de piste minimum

1.694290944 mm

Couches internes

LARGUEUR DE PISTE REQUISE (W)

4.407595963

mm

RÉSISTANCE

0.002832835427

Ω

CHUTE DE TENSION

0.007898506281

V

PERTE DE PUISSANCE

0.02359551884

W

Couches externes à l'air libre

LARGUEUR DE PISTE REQUISE (W)

1.694290944

mm

RÉSISTANCE

0.006849162974

Ω

CHUTE DE TENSION

0.02054746892

V

PERTE DE PUISSANCE

0.06154240977

W

Figure 13 calcul des pistes partie puissance



0.075

μm

ÉPAISSEUR (T)

75

μm

AUGMENTATION DE TEMPÉRATURE (T_{RISE})

2

°C

AMBIENT TEMPERATURE

25

°C

LONGUEUR DE PISTE

2

po

FORMULE

Calculez d'abord la surface :

$$A = \left(\frac{I}{k \times T_{Rise}} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Puis calculez la largeur :

$$W = \frac{A}{t \times 1.378}$$

Pour couches internes IPC-2221 : k = 0.024, b = 0.44, c = 0.725

Pour couches externes IPC-2221 : k = 0.048, b = 0.44, c = 0.725

où k, b et c sont les constantes résultant de l'ajustement de la courbe aux courbes IPC-2221.

Valeurs courantes :

Épaisseur : 1 oz

Température ambiante : 25 C

Augmentation de la température : 10 C

Largeur de piste minimum

0.02719342170 mm



Largeur de piste minimum

0.01045321951 mm



Couches internes

LARGEUR DE PISTE REQUISE (W)

0.02719342170

mm

RÉSISTANCE

0.4267383093

Ω

CHUTE DE TENSION

0.03200653732

V

PORTE DE PUISSANCE

0.00240040299

W

Couches externes à l'air libre

LARGEUR DE PISTE REQUISE (W)

0.01045321951

mm

RÉSISTANCE

1.110134039

Ω

CHUTE DE TENSION

0.08328005296

V

PORTE DE PUISSANCE

0.006244503971

W

20

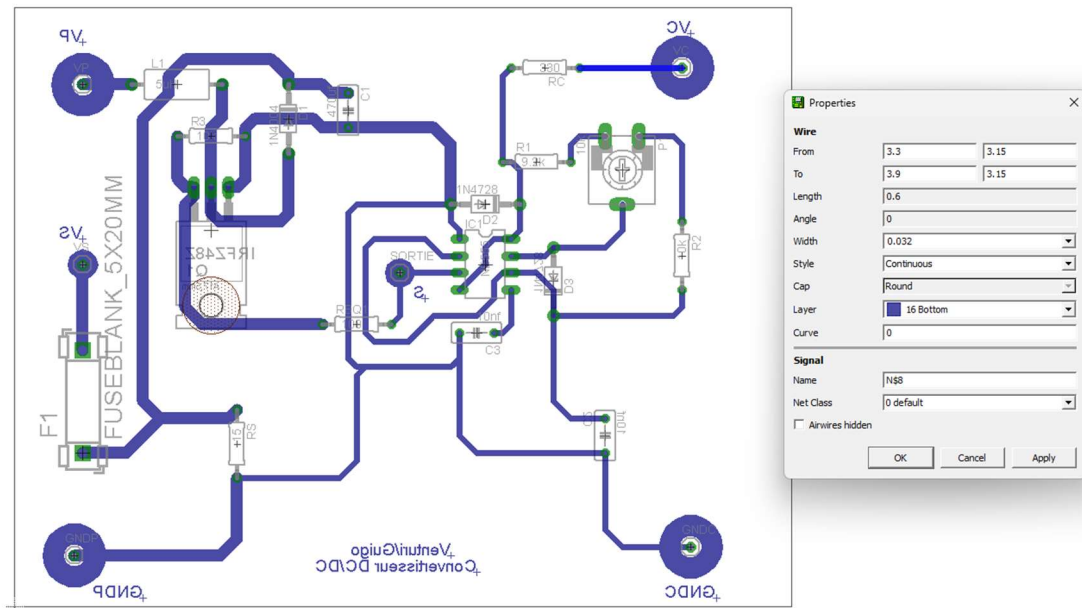


Figure 16 Largeur des pistes de la partie commande

Ce choix différencié entre pistes de puissance et de commande permet d'optimiser à la fois la compacité du circuit et sa robustesse thermique. Il s'inscrit dans une démarche de conception visant à fiabiliser le système et à garantir son bon fonctionnement en conditions réelles.

Une largeur de piste insuffisante aurait pu entraîner un échauffement excessif, voire une dégradation du circuit, ce qui justifie le choix retenu.

7.2.2 Routage final

Après validation du schéma électrique, l'étape suivante consiste à réaliser le routage de la carte électronique à l'aide du logiciel EAGLE. Cette phase permet de transformer le schéma théorique en une implantation physique exploitable pour la fabrication du circuit imprimé.

Le routage a été réalisé en respectant plusieurs règles essentielles de conception la séparation claire entre la partie puissance et la partie commande afin de limiter les perturbations électromagnétiques, la minimisation de la longueur des pistes transportant des courants élevés, notamment autour de l'inductance, de la diode et du transistor de commutation, l'élargissement des pistes de puissance pour réduire les pertes ohmiques et l'échauffement, le positionnement des condensateurs de découplage au plus près des broches d'alimentation des composants, le respect des distances d'isolement et des règles de fabrication standards, et l'organisation logique des composants afin de faciliter la lecture du circuit et l'assemblage.

Le routage final de la carte est présenté ci-dessous :

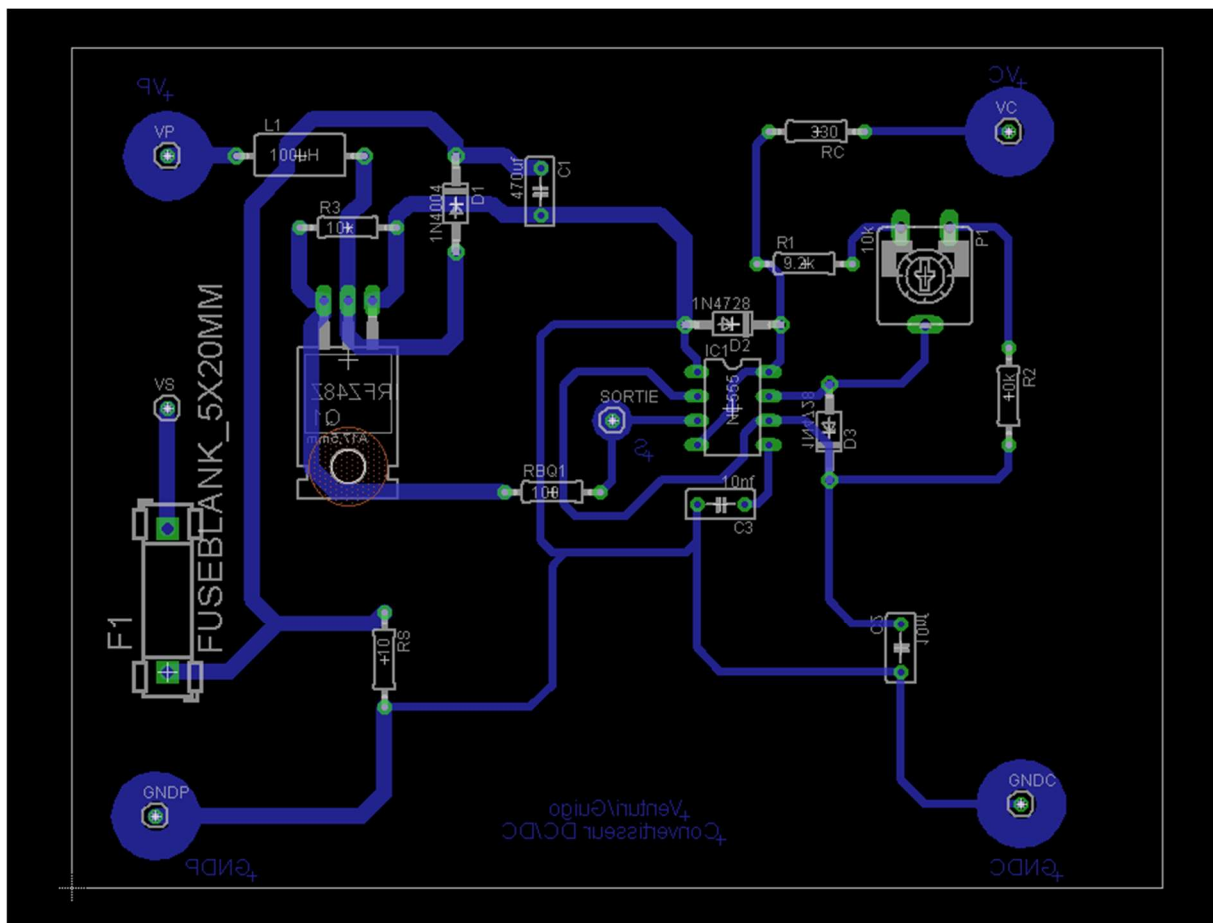


Figure 17 routage final

7.3 Conception de la carte électronique

Après la réalisation du routage sous le logiciel EAGLE, l'étape suivante consiste à fabriquer la carte électronique correspondant au circuit imprimé. Cette étape permet de passer du modèle numérique à une réalisation physique exploitable.

Dans un premier temps, le circuit imprimé est imprimé sur un papier calque. Ce calque contient le tracé des pistes qui devront être conservées sur la carte finale.

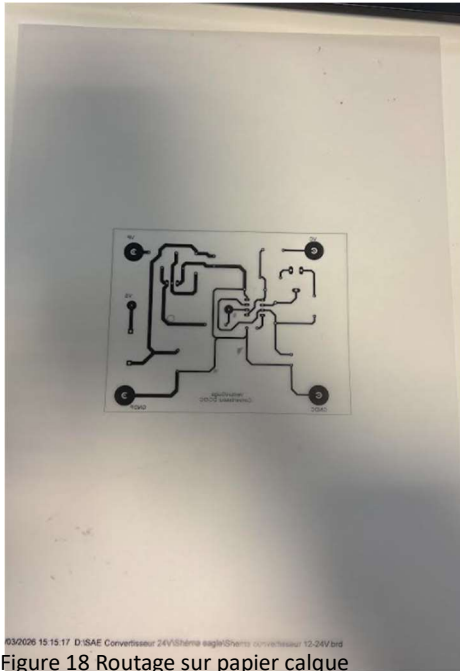


Figure 18 Routage sur papier calque

Le calque est ensuite placé dans une machine d'insolation qui permet de transférer le motif sur une plaque époxy recouverte de cuivre. Les zones correspondant aux pistes sont protégées grâce au masque réalisé précédemment.



Figure 19 Machine d'insolation

La carte est ensuite plongée dans un bain de révélation puis dans un bain de gravure. Lors de cette étape, le cuivre non protégé est dissous, ne laissant apparaître que les pistes électriques du circuit.



Figure 20 machine de gravure

Une fois la gravure terminée, la carte est rincée puis séchée avant de passer à l'étape de perçage.

7.4 Nomenclature

Afin de réaliser le montage électronique, une nomenclature des composants a été établie. Elle regroupe l'ensemble des composants nécessaires à la réalisation du convertisseur boost.

Cette nomenclature permet de faciliter l'assemblage, de vérifier la disponibilité des composants et d'assurer la traçabilité du projet.

Composant	Référence ou code commande	Prix (TTC)
RC 330Ω	707-7622	1,52 € (1 paquet de 10 unités)
R1-R2-R3 10kΩ	707-7745	2,03 € (1 paquet de 10 unités)
RBQ1 100Ω	131-772	1,70 € (1 paquet de 10 unités)
RS 15Ω	148-051	0,78 € (1 paquet de 10 unités)
D 1N4728	805-0034	5,80 € (1 paquet de 100 unités)
Diode Schottky	486-4460	1,055 € (1 paquet de 5 unités)
C1 470uF	814-3290P	3,66 €
C2-C3 10nF	699-4920	17,41€ (1 paquet de 10 unités)
NE555	866-0199	17,95 € (1 tube de 50 unités)
Q1 mosfet	540-9777	1,46 €
Inductance ferromagnétique	SCF25XV-350-2R4A003JV	11,27 €

7.5 Fabrication et assemblage

Après la gravure, la carte est percée afin de permettre l'insertion des composants électroniques. Le perçage est réalisé avec une perceuse adaptée, en respectant les emplacements définis lors du routage.

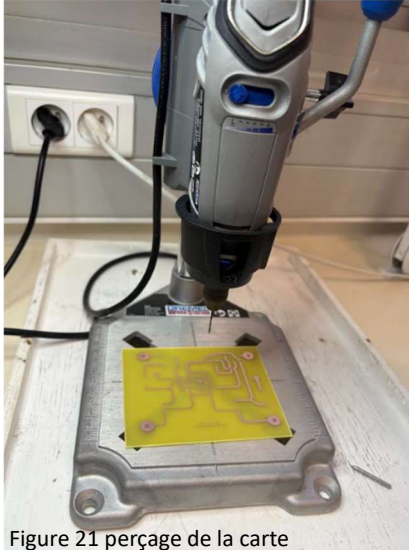


Figure 21 perçage de la carte

Une fois les trous réalisés, les composants sont insérés puis soudés sur la carte. Une attention particulière est portée au sens des composants polarisés, tels que les diodes, les condensateurs électrolytiques et le MOSFET.

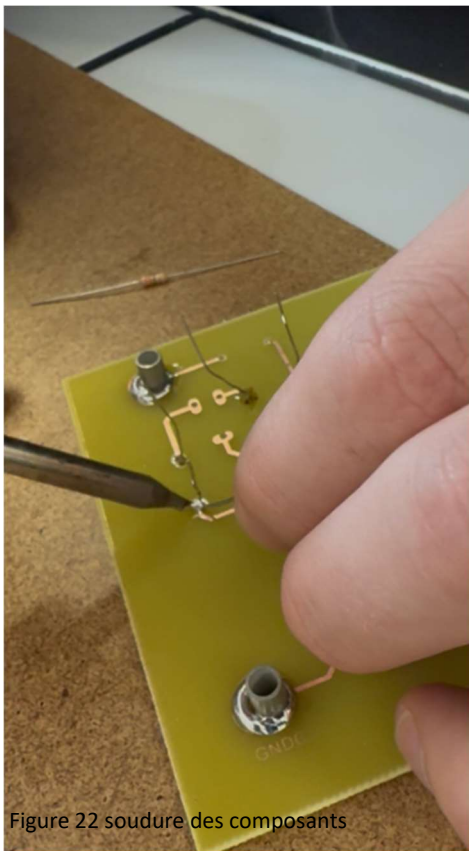


Figure 22 soudure des composants

Cette étape d'assemblage est essentielle pour garantir le bon fonctionnement du circuit et assurer des connexions électriques fiables.

7.6 Fiche de vérification

Avant la mise sous tension du convertisseur, une série de vérifications a été réalisée afin de garantir la sécurité du montage et éviter toute détérioration des composants.

Une vérification de la continuité électrique a été effectuée à l'aide d'un multimètre afin de s'assurer que les pistes sont correctement reliées et qu'aucun court-circuit n'est présent.

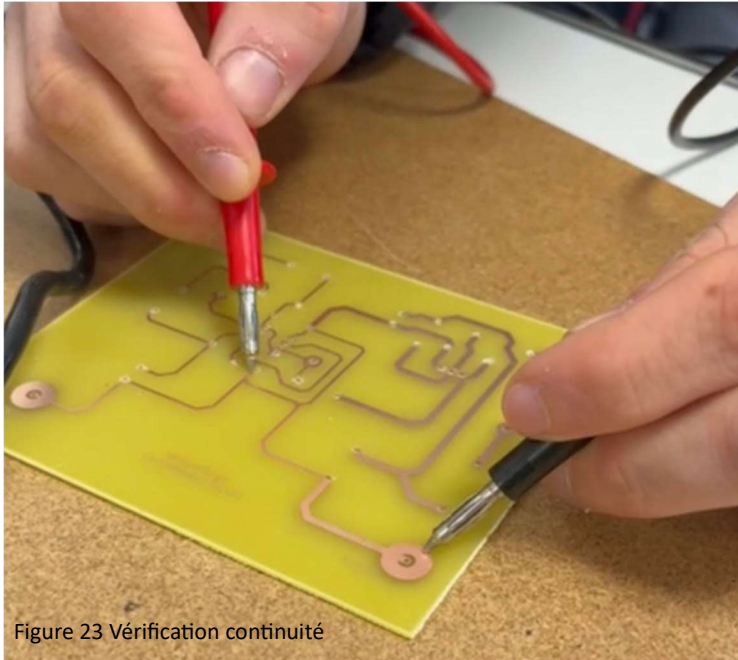


Figure 23 Vérification continuité

Cette étape permet de valider le câblage avant l'alimentation du circuit et constitue une phase essentielle dans la démarche de mise en service.

Pour plus d'information, voir la fiche de vérification en annexe.

8. Résultat expérimentaux

8.1 Mesure tension de sortie et d'entrée

Après validation du montage, des mesures expérimentales ont été réalisées afin de vérifier le bon fonctionnement du convertisseur boost.

La tension d'entrée est présente grâce à un générateur de tension et correspond à une valeur d'environ 12 V, conforme au cahier des charges.



Figure 24 tension d'entrée

La tension de sortie a été mesurée grâce à un multimètre et atteint une valeur proche de 24 V, ce qui confirme le bon fonctionnement du convertisseur élévateur.

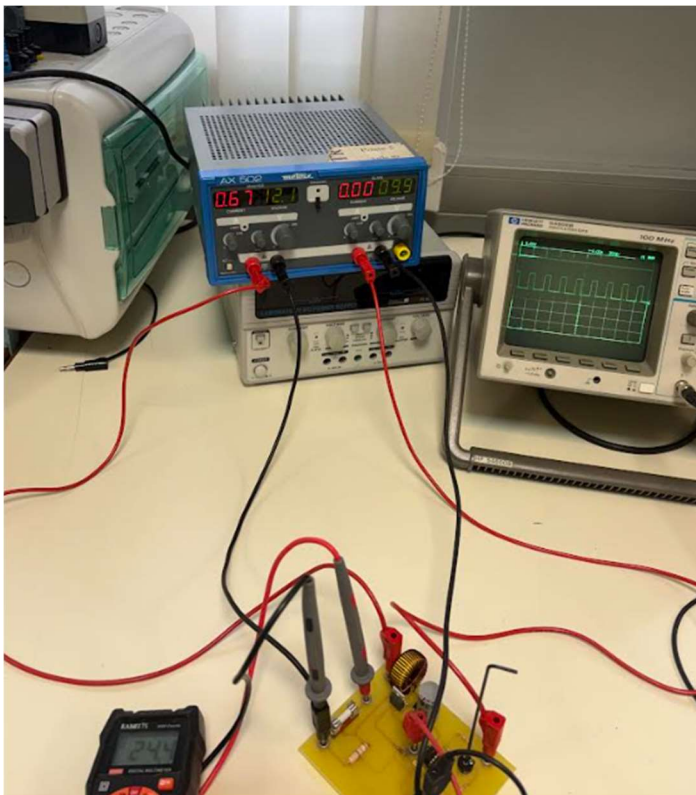


Figure 25 Tension de sortie

Ces résultats montrent que le convertisseur permet bien d'élever la tension conformément aux attentes

8.2 Signal de commande

Le signal de commande généré par le circuit NE555 a été observé à l'aide d'un oscilloscope. Ce signal correspond à une modulation de largeur d'impulsion (MLI) utilisée pour piloter le MOSFET.

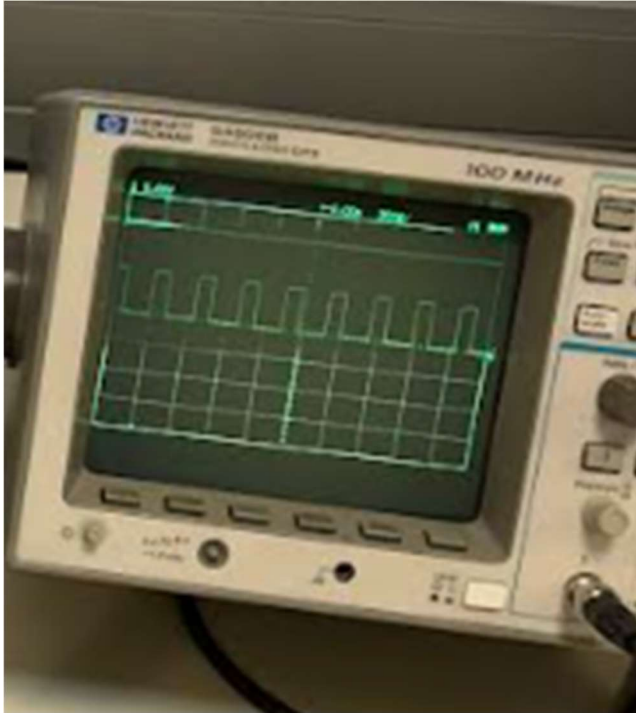


Figure 26 Signal de commande

On observe un signal périodique de forme carrée, dont le rapport cyclique est proche de 50 %, ce qui correspond à la valeur théorique nécessaire pour obtenir une tension de sortie de 24 V.

8.3 Vérification du fonctionnement

Les différentes mesures réalisées permettent de valider le bon fonctionnement global du convertisseur. La tension de sortie obtenue est conforme à la valeur attendue, et le signal de commande est correctement généré.

La continuité électrique ainsi que l'absence de court-circuit ont également été vérifiées, ce qui confirme la qualité de la réalisation de la carte.

8.4 Comparaison théorique et pratique

Une comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux a été réalisée afin d'évaluer la précision du modèle et les performances du montage réel.

Valeurs	Théorique	Pratique
Tension en entrée	12 V	12.1V
Tension de sortie	24 V	24.4 V
Rapport cyclique	50 %	$\simeq$ 50 %

Les écarts observés sont particulièrement faibles entre théorie et pratique ce qui valide la mise en pratique de la théorie.

8.5 Difficultés rencontrées

Au cours de la réalisation pratique du convertisseur, plusieurs difficultés ont été rencontrées. L'une des principales concernait le dimensionnement mécanique du porte-fusible, qui ne correspondait pas aux perçages réalisés sur le circuit imprimé.

Afin de corriger ce problème, une adaptation a été nécessaire. Un perçage complémentaire a été effectué sur la plaque, puis une connexion électrique a été réalisée entre la patte du porte-fusible et la piste en cuivre à l'aide d'un fil conducteur.

Cette solution, même si elle n'est pas parfaite nous a permis d'assurer la continuité électrique et le bon fonctionnement du système. Elle met en évidence l'importance de la prise en compte des contraintes mécaniques dès la phase de conception.

Cette expérience souligne également la nécessité d'une vérification approfondie de l'implantation des composants avant la fabrication du circuit imprimé.

9. Conclusion

Ce projet de conception et de réalisation d'un convertisseur DC-DC de type Boost a permis de mettre en œuvre l'ensemble des étapes d'un développement en électronique de puissance, allant de l'analyse du besoin jusqu'à la validation expérimentale du système. L'objectif principal, consistant à élever une tension continue de 12 V à 24 V, a globalement été atteint, avec un fonctionnement conforme aux attentes.

L'étude théorique a permis de comprendre le principe de fonctionnement du convertisseur et de dimensionner les composants principaux, tels que l'inductance, le MOSFET et la diode. Cette phase a été essentielle pour anticiper le comportement du système et orienter les choix techniques.

La simulation a ensuite permis de valider ces choix dans un environnement contrôlé, avant le passage à la réalisation pratique.

La phase de conception du circuit imprimé, notamment le routage et le dimensionnement des pistes, a mis en évidence l'importance des contraintes physiques et thermiques dans un système réel. Une attention particulière a été portée à la séparation des zones de puissance et de commande, ainsi qu'à la réduction des boucles de courant afin de limiter les perturbations électromagnétiques.

Les tests expérimentaux ont permis de vérifier le bon fonctionnement du convertisseur et de comparer les résultats obtenus avec les valeurs théoriques. Des écarts ont été observés, notamment en raison des pertes dans les composants (chute de tension de la diode, pertes de commutation du MOSFET, résistances parasites), ce qui met en évidence les limites du modèle idéal utilisé en phase de conception.

Par ailleurs, la réalisation pratique a également permis de mettre en évidence certaines difficultés, notamment liées à l'intégration mécanique des composants. Ces contraintes ont nécessité des adaptations en cours de projet, soulignant l'importance d'une validation complète du design en amont de la fabrication.

Enfin, ce projet a permis de développer une démarche rigoureuse de conception et de vérification, en intégrant à la fois des aspects théoriques, pratiques et expérimentaux. Des améliorations restent envisageables, notamment en termes de rendement énergétique, d'optimisation du routage ou encore de choix de composants. Ces perspectives ouvrent la voie à une version plus performante et plus proche des standards industriels.

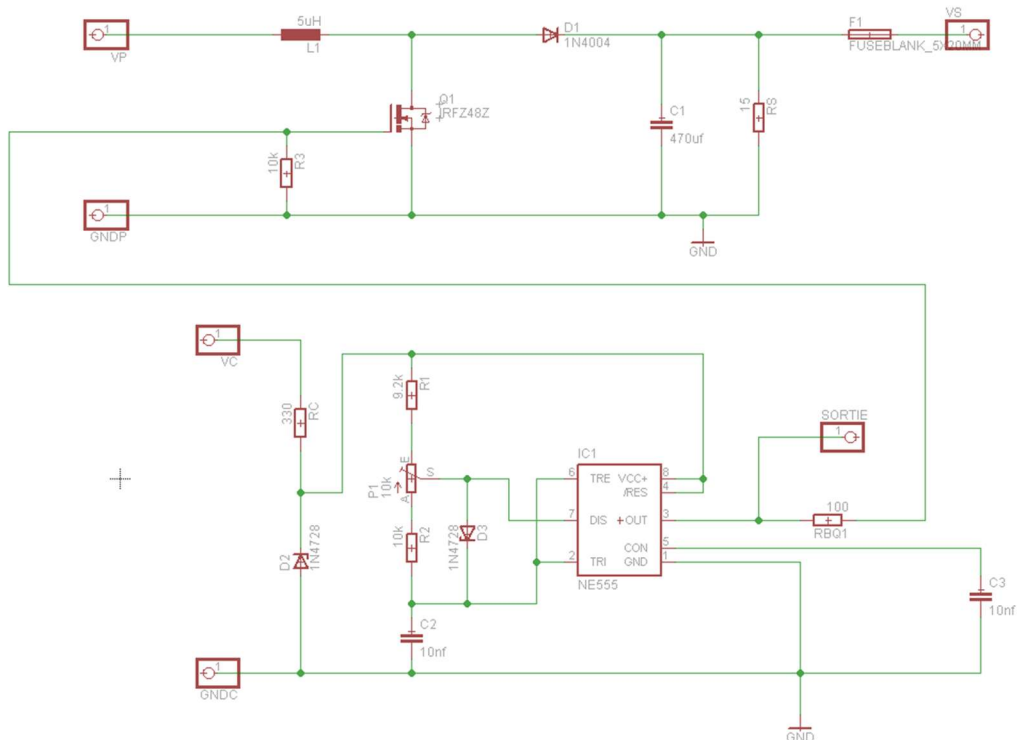
10. Annexes

Fiche de vérification d'un Convertisseur Boost 12V-24V

1. Introduction

Le projet consiste à concevoir, réaliser et valider un convertisseur DC-DC de type Boost permettant d'élever une tension continue de 12 V à 24 V, dans le cadre d'un système embarqué. L'objectif est de garantir une tension de sortie stable tout en optimisant le rendement énergétique et en assurant la fiabilité du système.

Le convertisseur Boost repose sur le stockage et le transfert d'énergie via une inductance commandée par un MOSFET. Lors de la phase de conduction (MOSFET passant), l'inductance emmagasine de l'énergie. Lors de la phase de blocage (MOSFET ouvert), cette énergie est transférée vers la charge via la diode, ce qui permet d'augmenter la tension de sortie.



2. Inspection visuelle

Afin de savoir si le système est apte à fonctionner, il faut effectuer un diagnostic visuel de la carte électronique, on y regarde si :

- Les pistes de puissance sont larges et continues
- Aucun court-circuit n'est visible
- Polarités respectées
- Zone de découpage compacte
- Les soudures sont correctes

Une attention particulière a été portée à la séparation des zones de puissance et de commande ainsi qu'à la compacité de la boucle de commutation afin de limiter les perturbations électromagnétiques.

3. Test de continuité

Ensuite, il faut vérifier la continuité des pistes électriques afin de s'assurer qu'il n'y ait pas de court-circuit pour cela on vérifie :

- Continuité Vin
- Continuité Vout
- Continuité GND
- Pas de court-circuit Vin/GND
- Pas de court-circuit Vout/GND

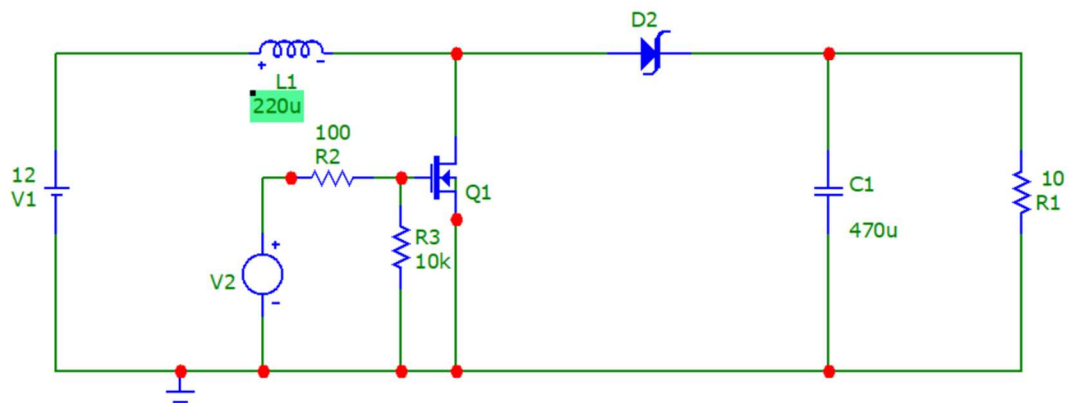
Ces vérifications permettent de garantir l'absence de défaut critique avant la mise sous tension, réduisant ainsi les risques de destruction des composants.

4. Vérification des composants

Le choix des composants a été réalisé en tenant compte des contraintes en tension, en courant et en fréquence de commutation afin d'assurer un fonctionnement fiable du convertisseur.

En tenant compte du schéma de simulation on vérifie :

- Inductance conforme
- Diode correcte (sens)
- MOSFET correct
- Condensateurs adaptés
- Résistances de feedback correctes



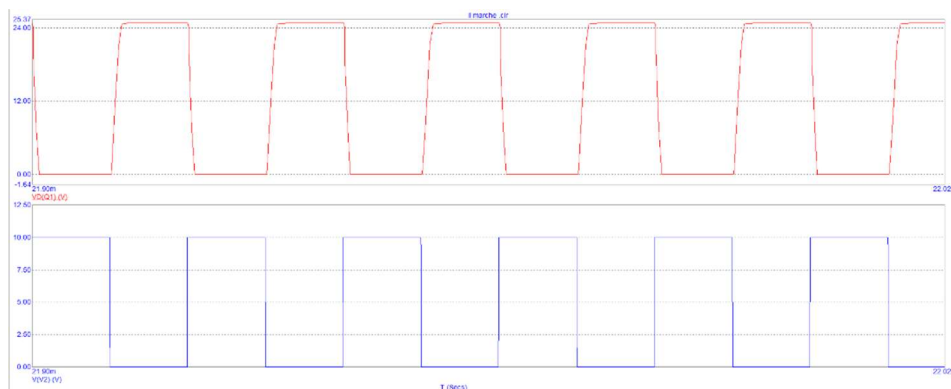
5. Mise sous tension sécurisée

Après s'être assuré de la forme visuelle cohérente du convertisseur, il faut effectuer une mise sous tension sécurisée grâce à un générateur de tension et veiller à respecter certain point :

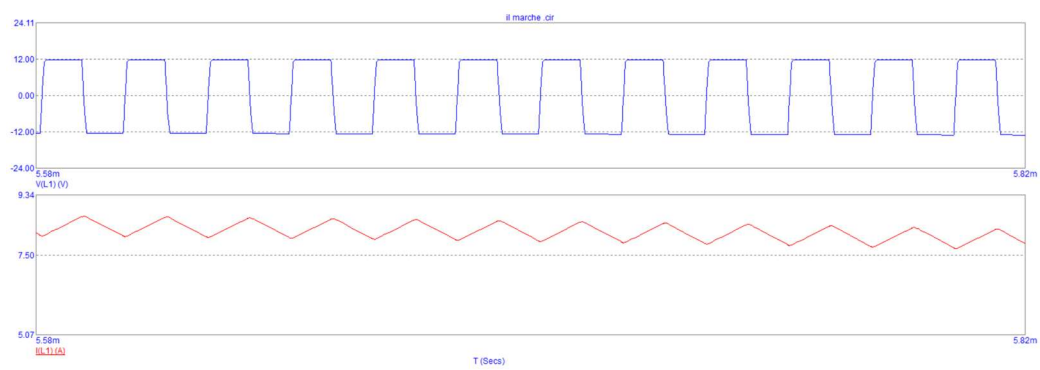
- Limitation de courant activée
- Alimentation partie commande puis puissance
- Montée progressive de la tension
- Surveillance consommation
- Aucune anomalie

6. Comparaison Théorique / Pratique

Afin que le convertisseur Boost fonctionne parfaitement, il est nécessaire que tout les paramètres soient respectés, plusieurs signaux sont attendus :

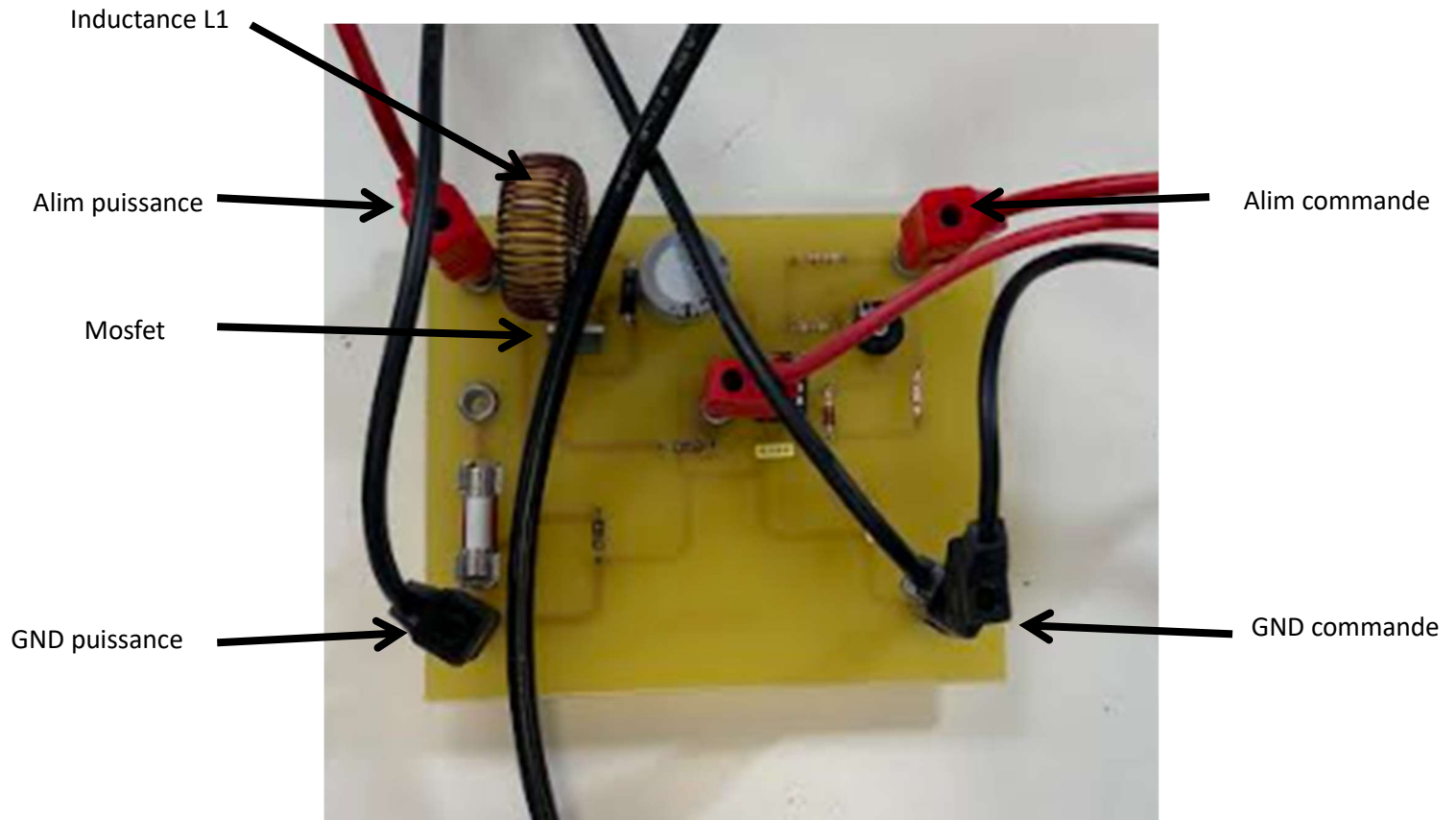


Commutation du Mosfet Q1



Tension et intensité de l'inductance

Il faut s'assurer de la commutation du Mosfet de puissance et de l'intensité de l'inductance L1 qui être un signal en dent de scie pour s'assurer de la bonne charge et décharge de la bobine.



Les écarts observés entre les valeurs théoriques et expérimentales s'expliquent principalement par les pertes dans les composants (diode, MOSFET, inductance) ainsi que par les effets parasites du circuit réel.

7. Test thermique

Il faut également vérifier le bon fonctionnement de certains composants, de manière à ce qu'ils ne surchauffent pas tel que :

- Si MOSFET OK
- Si Diode OK
- Si Inductance OK
- Si Pas de surchauffe

Une élévation de température modérée a été observée sur les composants de puissance, ce qui reste cohérent avec les pertes attendues dans le convertisseur.

8. Test en charge

Il a fallu effectuer des tests avec plusieurs valeurs de charges, légère, nominale et s'assurer d'une tension toujours stable

Le comportement du convertisseur reste stable en charge nominale, ce qui valide le dimensionnement des composants et la robustesse du système.

9. Analyse des résultats

Le fonctionnement observé est conforme au principe théorique du convertisseur Boost. L'augmentation de la tension de sortie est directement liée au rapport cyclique du signal de commande.

Les écarts mesurés sont principalement dus à la chute de tension de la diode, les pertes de commutation du MOSFET, la résistance série de l'inductance et les pertes dans les pistes du PCB

10. Améliorations possibles

Plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés. Tels que l'optimisation du routage pour limiter les inductances parasites, l'amélioration du filtrage de sortie pour réduire l'ondulation et effectuer une étude du rendement global du convertisseur

11. Conclusion

Le convertisseur Boost réalisé permet d'élever efficacement la tension d'entrée conformément au cahier des charges. Les tests expérimentaux ont validé le bon fonctionnement global du système, avec une tension de sortie stable et un comportement conforme aux attentes.

Les écarts observés entre théorie et pratique mettent en évidence les limites du modèle idéal et l'importance des pertes dans les composants. Ce projet a permis de mettre en œuvre une démarche complète d'ingénierie, allant de la conception à la validation expérimentale.

Des améliorations restent possibles, notamment en optimisant le rendement et le choix des composants, ce qui ouvre des perspectives d'évolution du système.