

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Physique

Option :

Physique des matériaux

Présenté par :

BENDJLIDJEL Zohra

Thème

Étude des paramètres géométriques et électromagnétiques d'une bobine intégrée dédiée à une installation photovoltaïque

Soutenu : 22 Juin 2023

Composition du jury :

Nom & prénoms	Grade	Domiciliation	Qualité
MELATI Rabia	MCA	Université de Mostaganem	Présidente
Bouattou Bezine	MAB	Université de Mostaganem	Examineur
ADDA BENATTIA Tekkouk	MCB	Université de Mostaganem	Encadrant

Année Universitaire 2022-2023

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma chère maman

Mes chers frères

À ma grande famille

Mon cher père que Dieu lui fasse

miséricorde

À

tous mes amis qui me

Sont chers

Remerciement

Mes remerciements vont tout premièrement, à ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

J'adresse mes sincères remerciements et reconnaissances à mon encadreur Monsieur ADDA BENATIA Tekkouk, Maitre de conférence « B » à l'université Abdelhamid Ibn Badis, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, pour son engagement, son aide et ses précieux conseils qu'il a sus me transmettre tout au long de ce travail.

J'exprime mon profond respect pour Madame MELATI Rabia maitre de conférences « A » à université de Mostaganem d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire de fin d'étude. On tient également a remercié Monsieur Bouattou Bezine Maitre-assistant à l'université Abdelhamid Ibn Badis, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique qui a accepté d'étudier mon travail en qualité d'examineur.

La réalisation de ce mémoire doit beaucoup au formidable soutien moral de ma famille, Je voudrais remercier tout particulièrement mes parents pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces années.

Enfin un grand merci à tous mes amis et mes collègues pour leur aide, appuis et encouragements incessants, ainsi qu'à toute personne qui a contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce mémoire.

Liste des figures

Figure I.1 : Principe de fonctionnement photovoltaïque[3]	15
Figure I.2: Composition d'un module solaire photovoltaïque [3].....	17
Figure I.3: Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules série.....	17
Figure I.4: Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle.....	18
Figure I.5: Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode	18
Figure I.6: Courbe caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule PV	20
Figure I.7: Puissance maximale idéale et pratique	22
Figure II.1 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation	25
Figure II.2:Schéma de principe d'un convertisseur BOOST élévateur de tension.....	25
Figure II.3:Interrupteur K passant	26
Figure II.4: Interrupteur K bloqué.....	26
Figure II.5 : Les différentes formes d'ondes du convertisseur abaisseur.....	27
Figure II.6 : Modèle physique du noyau magnétique de la micro-bobine.....	32
Figure II.7:Les différents paramètres constitutants.....	33
Figure III.1 Le modèle physique de la micro-bobine.....	40
Figure III.2 : Le maillage du domaine d'étude	40
Figure III.3:Variation de l'inductance en fonction de la fréquence.....	41
Figure III.4 : Variation de la résistance en fonction de la fréquence.....	42
Figure III.5 : Variation de facteur de qualité en fonction de la fréquence.....	43
Figure III.6 : Distribution des lignes de champs magnétiques dans la bobine.....	44
Figure III.7Variation des densités du flux suivant la fréquence du travail	45
Figure III.8 Coupe transversale de densité de flux magnétique	46
Figure III.9 Évolution de la densité de flux suivant la longueur d'arc.....	46
Figure III.10 : Densité de courant (volume) (1MHz).....	47
Figure III.11 Densité de courant coupe transversale	48
Figure III.12 : Répartition de la densité de courant suivant l'axe (OZ):.....	48

Liste des tableaux

<i>Tableau II-1 :Paramètres électriques du convertisseur Buck DC-DC</i>	<i>29</i>
<i>Tableau II-2:Matériaux conducteur utilisés pour les micros- bobines.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau II-3caractéristiques électriques et magnétiques du ferrite NiZn (CM48)[19].....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau II-4:Valeurs des coefficients utilisés par Mohan</i>	<i>34</i>
<i>Tableau II-5 Résultats du dimensionnement géométrique</i>	<i>36</i>
<i>Tableau III-1:Paramètres géométriques de la bobine étudiée.....</i>	<i>39</i>

Résumé

Notre étude porte sur l'analyse des paramètres géométriques et électromagnétiques d'une bobine intégrée dédiée à une installation photovoltaïque. Notre objectif est de comprendre comment ces paramètres influencent les performances du système et d'identifier les meilleures pratiques pour optimiser la conception et l'intégration de la bobine dans le système photovoltaïque. Les résultats de cette étude peuvent contribuer à améliorer l'efficacité et la fiabilité des installations photovoltaïques. En simulant le comportement magnétothermique de la micro-bobine.

Nous avons analysé à l'aide de logiciel COMSOL, les distributions du champ magnétique à l'intérieur et à l'extérieur de la bobine, ainsi que les variations de densité de courant induites par le courant électrique. Ces informations sont cruciales pour évaluer les performances de la bobine, notamment en termes d'efficacité énergétique, de dissipation thermique et de résistance à la surchauffe.

Nous avons constaté que les résultats de simulation effectués montrent un comportement approprié de la densité de flux magnétique et de la densité de courant admissible dans la micro-bobine dimensionnée. Ces résultats indiquent que le dimensionnement géométrique de la bobine est adéquat.

Mots clés : Micro-bobine, intégration, dimensionnement, convertisseur DC-DC

Abstract

Our study focuses on the analysis of the geometric and electromagnetic parameters of an integrated coil dedicated to a photovoltaic installation. We aim to understand how these parameters influence system performance and identify best practices to optimize the design and integration of the coil in the photovoltaic system. The results of this study can contribute to improving the efficiency and reliability of photovoltaic installations.

By simulating the magneto-thermal behavior of the micro-coil, we can analyze the magnetic field distributions inside and outside the coil, as well as the current density variations induced by the electric current. This information is crucial for evaluating the performance of the coil, especially in terms of energy efficiency, heat dissipation and resistance to overheating.

We found that the simulation results performed using COMSOL Multiphysics software show appropriate behavior of magnetic flux density and allowable current density in the dimensioned micro-coil. These results indicate that the geometric sizing of the coil is adequate

Key words: coil, *integration, sizing, DC-DC converter* .

تتعلق دراستنا بتحليل المعلمات الهندسية والكهرومغناطيسية لملف متكامل مخصص للتركيب الكهروضوئي. هدفنا هو فهم كيفية تأثير هذه المعلمات على أداء النظام وتحديد أفضل الممارسات لتحسين تصميم وتكامل الملف في النظام الكهروضوئي. يمكن أن تساعد نتائج هذه الدراسة في تحسين كفاءة وموثوقية التركيبات الكهروضوئية. من خلال محاكاة السلوك المغناطيسي للحرارة للملف الصغير.

حللنا باستخدام برنامج COMSOL ، توزيعات المجال المغناطيسي داخل وخارج الملف ، وكذلك الاختلافات في كثافة التيار الناجم عن التيار الكهربائي. هذه المعلومات مهمة لتقييم أداء الملف ، خاصة فيما يتعلق بكفاءة الطاقة ، وتبديد الحرارة ومقاومة ارتفاع درجة الحرارة.

وجدنا أن نتائج المحاكاة التي تم إجراؤها تظهر السلوك المناسب لكثافة التدفق المغناطيسي وكثافة التيار المسموح بها في الملف الصغير ذي الأبعاد. تشير هذه النتائج إلى أن الحجم الهندسي للملف مناسب.

الكلمات المفتاحية: لفائف صغيرة ، تكامل ، تحجيم ، محول DC-DC

Dédicaces	I
Remerciement	II
Liste des figures	III
Liste des tableaux	IV
Résumé	V
Abstract	VI
ملخص	VII
Introduction générale	11
Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques	12
I.1 Introduction	13
I.2 Historique sur photovoltaïques	13
I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule	14
I.4 Les matériaux semi-conducteurs	15
I.4.1 Les semi-conducteurs intrinsèques	15
I.4.2 Les semi-conducteurs extrinsèques	15
I.5 Technologie des cellules photovoltaïques	16
I.5.1 Les cellules en silicium monocristallines	16
I.5.2 Les cellules en silicium poly cristallines	16
I.5.3 Les cellules en silicium amorphes	16
I.6 Le module photovoltaïque	16
I.7 Association de cellule photovoltaïque	17
I.7.1 Association série	17
I.7.2 Association en parallèle	17
I.8 Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque	18
I.8.1 Modélisation d'une cellule PV	18
I.8.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	19
I.8.2.1 Courant de court-circuit	19
I.8.2.2 Tension de circuit-ouvert	20
I.8.2.3 La courbe courant-tension	20
I.8.2.4 Puissance de la cellule PV	21
I.8.2.5 Puissance maximale d'une cellule PV	21
I.9 Conclusion :	22
Chapitre II: Bobines planaire pour les convertisseurs de puissance DC-DC	23
II.1 Introduction	24
II.2 Présentation du micro-convertisseur	24

II.2.1	Cahier des charges de convertisseur BOOST	25
II.2.2	Principe de fonctionnement d'un élévateur de tension.....	25
II.2.3	Calcul de la valeur de ΔI_L	28
II.2.4	Calcul de la valeur de α	29
II.2.5	Calcul de la valeur de l'inductance L	29
II.2.6	Calcul de la valeur la résistance R.....	29
II.2.7	Calcul de la valeur de la capacité C.....	29
II.3	Les matériaux utilisés dans l'intégration des bobines	30
II.3.1	Les matériaux magnétiques	30
II.3.2	Les matériaux diélectriques:.....	30
II.3.3	Les matériaux conducteurs	30
II.4	Les paramètres géométriques de la bobine planeaire	31
II.4.1	Calcul de l'énergie stockée dans le noyau magnétique.....	31
II.4.2	La densité volumique d'énergie.....	31
II.4.3	Calcul du volume du noyau magnétique	32
II.5	Dimensionnement de la micro-bobine avec un noyau magnétique.....	32
II.5.1	Calcul du diamètre externe et interne	33
II.5.2	Calcul le diamètre moyen d_{avg} et du facteur de forme ρ	33
II.5.3	Calcul la valeur de n (nombre de spire).....	34
II.5.4	Calcul de la hauteur et la largeur du ruban conducteur	34
II.5.5	Calcul de la distance inter-spires	35
II.5.6	Calcul de la longueur moyenne	35
II.6	Tableau récapitulatif du dimensionnement géométrique.....	36
II.7	Conclusion	36
Chapitre III: Simulation des effets électromagnétiques de la bobine dimensionnée		38
III.1	Introduction.....	39
III.2	Le modèle physique de la bobine.....	39
III.3	Le maillage.....	40
III.4	Simulation des paramètres électromagnétique de la micro-bobine	40
III.4.1	Variation de l'inductance	41
III.4.2	Variation de la résistance.....	41
III.4.3	Variation du facteur de qualité Q.....	42
III.4.4	Distribution des lignes de champ magnétique	43
III.4.5	Le flux magnétique	44
III.4.6	La densité de courant	46

III.5 Conclusion	49
Conclusion générale	50

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des capteurs ou à des centrales solaires photovoltaïques. C'est une énergie renouvelable, car le soleil est considéré comme une source inépuisable à l'échelle du temps humain. L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable.

L'optimisation d'un système solaire est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement dans les meilleures conditions. Parmi ces systèmes nous dirigeons les flèches vers le rôle des convertisseurs d'énergie de type DC/DC.

L'intégration des composants passifs, tels que les inductances, est devenue extrêmement importante ces dernières années dans le domaine de l'électronique. Les inductances sont des composants essentiels pour de nombreux dispositifs électroniques, notamment les convertisseurs de puissance, les filtres, les amplificateurs et les circuits de communication.

Notre travail est structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous introduisons des informations générales sur les cellules photovoltaïques. Nous considérons la structure de base d'une cellule photovoltaïque, son principe de fonctionnement, ainsi que les combinaisons série et parallèle d'un module photovoltaïque.

Deuxième chapitre « Intégration des bobines et des convertisseurs DC-DC ». Nous préconisons dans un premier temps la spécification pour le convertisseur BOOST 24/220V, puis nous calculons la valeur de la micro-bobine qui sera intégrée dans le convertisseur DC-DC ainsi que la valeur du condensateur inclus. Enfin, nous présentons différents matériaux utilisés dans l'intégration de composants passifs pour la conversion d'énergie.

Pour valider les résultats de calcul analytique, nous avons consacré le troisième chapitre intitulé « Étude des effets électromagnétiques de la bobine planaire ». Avec le logiciel de simulation COMSOL Multi-physique, nous effectuons les simulations de grandeurs électromagnétiques telles que la densité de flux magnétique et la densité de courant de la bobine spirale planaire dimensionnée.



***Chapitre I:Généralités sur les systèmes
photovoltaïques***

I.1 Introduction

Le coût de l'énergie est actuellement un frein majeur à son développement. Dans le cadre des installations photovoltaïques j'ai constaté que l'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non captée disponible en abondance sur toute la surface de la terre et, malgré une forte atténuation lorsqu'elle traverse l'atmosphère, Par exemple, cela vient de la conversion directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion est effectuée à l'aide d'une cellule photoélectrique. Il en résulte une conversion directe en un semi-conducteur de l'électron photon.

I.2 Historique sur photovoltaïques

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell laboratoires qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires. La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 1970 à (7,62 cm) à la fin des années 1970, et à 10,16 cm au début des années 1980, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté [1].

1839 : Antoine Becquerel publie un mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires relatif à une expérience menée par son fils, Edmond avec une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Cette pile est capable de fournir un courant.

1877 : W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium, et C. Frittes et au point le premier panneau photovoltaïque à base de cellules au sélénium. L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre.

1905 : Albert Einstein publie un article sur l'effet photoélectrique, Et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. ce pour quoi il obtient un prix Nobel en 1921.

1954 : DM Chapin , CS Fuller et GL Pearson, ingénieurs de Bell Téléphone Laboratoires (USA), annoncent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion de puissance atteint 6 %, marquant véritablement la naissance du photovoltaïque.

1959 : les États-Unis mettent en orbite Vanguard, le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques.

1970 : les crises pétrolières renforcent l'intérêt et les crédits accordés à l'énergie photovoltaïque.

1978 : le premier mégawatt crête installé est atteint dès 1978.[2]

I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule

Les cellules photovoltaïques utilisent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu en absorbant le rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir l'énergie lumineuse en photons. Ces photons créent des paires électron-trou avec une plus grande énergie à travers les semi-conducteurs, ce qui conduit à une accumulation de tension appelée photo voltage, qui conduit à son tour au courant. L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. [3]

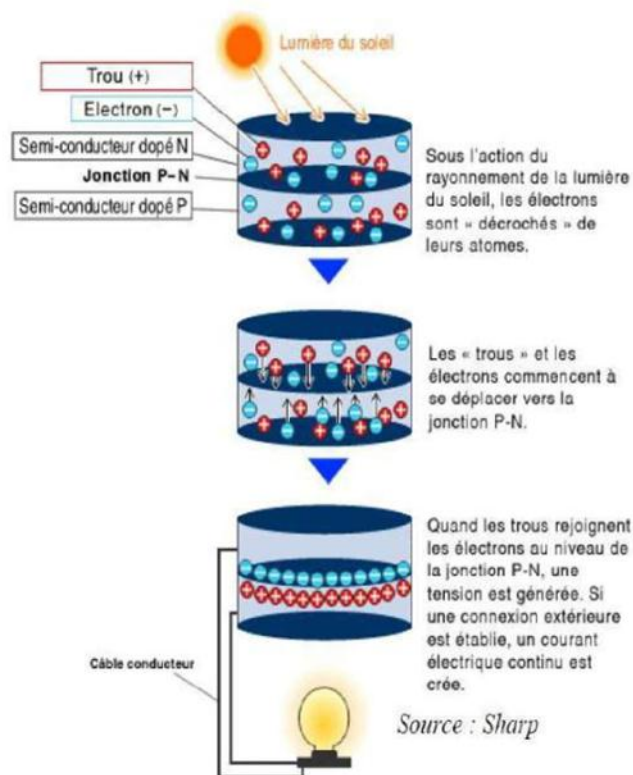


Figure I.1 : Principe de fonctionnement photovoltaïque[3]

I.4 Les matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants, par exemple le silicium et le germanium dont les quatre électrons de valence permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin.

I.4.1 Les semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le semi-conducteur énergétique est constitué de deux bandes conduction et bande valence séparées par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...). Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trous et d'électrons est le même.[4]

I.4.2 Les semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs utilisés on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.[5]

I.5 Technologie des cellules photovoltaïques

Dans la cellule photovoltaïque, le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé, et c'est aussi un matériau de base très important dans tous les types de cellules. Et cela joue un rôle important dans le coût total de l'installation.

Dans la fabrication des cellules, trois types de cellules photovoltaïques en silicium existent: monocristallin, poly cristallin ou amorphe. Les cellules monocristallines et les cellules poly cristallines sont les plus répandues mais leur fragilité est protégée par des panneaux de verre, ce qui augmente encore le poids du panneau solaire.[6]

I.5.1 Les cellules en silicium monocristallines

Les monocristallins sont des phototrophes de première génération, mais la production est très difficile, pour obtenir un cristal pur cela demande beaucoup d'énergie avec un rendement de 12 à 17.[7][8]

I.5.2 Les cellules en silicium poly cristallines

À partir d'un bloc de silicium amorphe on peut obtenir de multiples cristaux, on voit aussi les différentes orientations des cristaux, leur rendement est moins élevé que celui des cellules monocristallines.[9]

I.5.3 Les cellules en silicium amorphes

Cellules amorphes, cette technologie permet d'utiliser des couches très fines de silicium. Parce que la production à moindre coût mais à très faible rendement.[7]

I.6 Le module photovoltaïque

Nous nous efforçons toujours d'économiser beaucoup d'énergie à partir de choses simples, de construire un champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. On peut connecter plusieurs cellules en série, ce qui conduit à une augmentation de la tension et du courant, tandis qu'en parallèle conduit à une augmentation du courant tout en maintenant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité en les encapsulant dans un polymère Forme EVA (éthylène-acétate de vinyle) et protégées sur la face avant du verre, Durci à haute transmission et bonne résistance mécanique, et sur la face arrière de A ou de polyéthylène.[10]



Figure I.2: Composition d'un module solaire photovoltaïque [3]

I.7 Association de cellule photovoltaïque

I.7.1 Association série

En ajoutant des cellules ou des modules identiques dans la série, la Branche actuelle reste la même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de Cellules (modules) dans la chaîne.

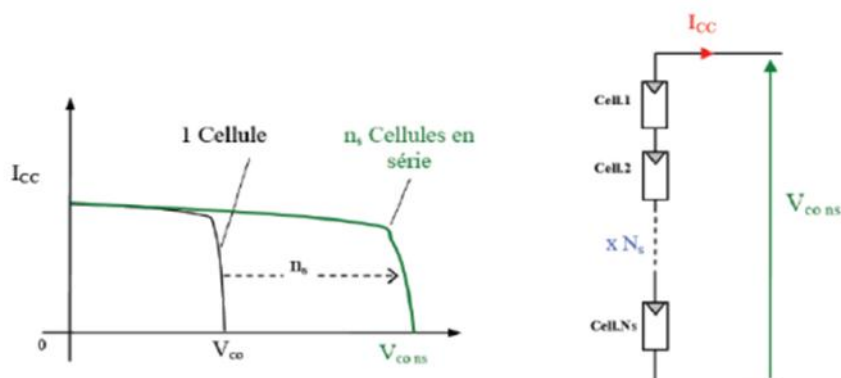


Figure I.3: Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules série

I.7.2 Association en parallèle

En ajoutant des unités ou cellules identiques en parallèle, la tension de branche est égale à la tension de chaque unité et la densité augmente proportionnellement au nombre d'unités parallèles dans la branche.[11]

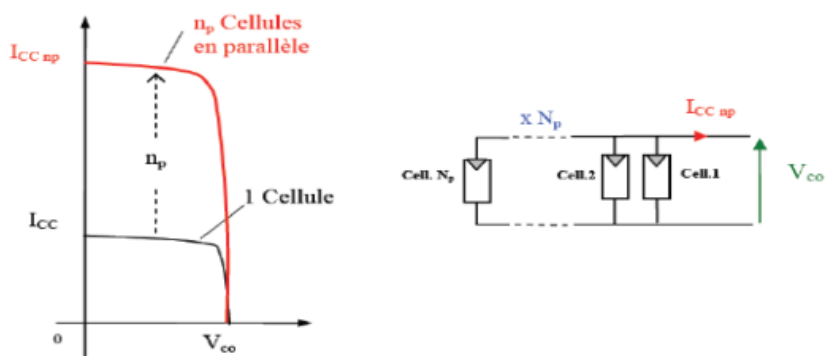


Figure 1.4: Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle

I.8 Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque

Afin de comprendre la composition et les propriétés physiques et électriques des éléments d'une cellule photovoltaïque, il faut choisir les circuits électriques spécifiques qui la composent pour créer un modèle équivalent pour cette cellule qui soit correct sans tenir compte du courant et de la tension de nombreux modèles mathématiques ont été développés pour représenter le comportement des jonctions semi conductrices non linéaires.

I.8.1 Modélisation d'une cellule PV

La cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source de courant idéal qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure (I.5) qui correspond à la jonction p-n de la cellule PV. [2][8][12]

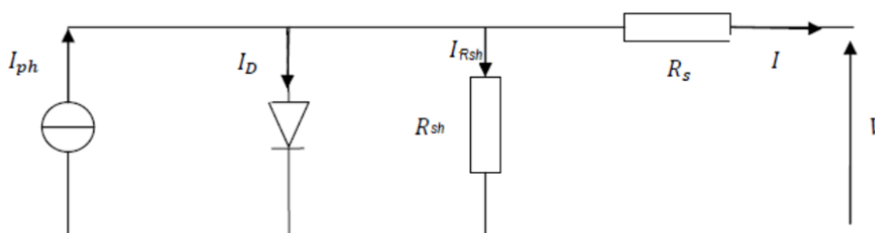


Figure 1.5: Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode

D'après La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \tag{I.1}$$

L'expression résultante à une caractéristique courant-tension (I-V) après tout calcul est

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \frac{V + (I * R_s)}{n v_t} - 1 \right] \frac{v + (I * R_s)}{R_{sh}} \quad I.2$$

Les expressions de (I_{ph}) et de (I_{sat}) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i(T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad I.3$$

$$I_{sat} = \left(I_{sc} * \exp \frac{V_{c0}}{n.v_t} - 1 \right) * \left(\frac{T}{298} \right)^3 * \exp \left[\frac{q * E_g * \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)}{n.k} \right] \quad I.4$$

Dou :

I_{ph} : Photo courant produit.

I_{sat} : Courant de saturation de la diode:

R_s, R_{sh} La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$V_t = \frac{Kt}{q}$ Tension thermique à la température T

q : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} C$)

K : Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} J/k$)

K_i : Constante ($1.2 / A \cdot cm \cdot K^2$)

n : Facteur de non idéalité de la jonction

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin

E_g : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

G : l'ensoleillement en W /m

I.8.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou à partir de l'équation, les caractéristiques les plus courantes sont les suivantes [8] :

I.8.2.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s est nulle et R_{sh} est infinie), ce courant se confond avec le photo-courant

I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.4), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \frac{q(I_{cc} * R_s)}{n k T} - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_s)}{R_{sh}} \quad I.5$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat} \left[\exp \frac{q(I * R_s)}{n k T} - 1 \right] \quad I.6$$

Devant I_{ph} . Donc l'expression approchée du courant de court-circuit et alors

$$I_{CC} = \frac{I_{ph} R_s}{(1 + R_{sh})} \quad I.7$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement ($I_{CC} = I_{ph}$).

I.8.2.2 Tension de circuit-ouvert

C'est la tension V_{CO} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque)

$$0 = I_{CC} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q.v}{nkt}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V}{R_{sh}}\right) \quad I.8$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{CO} = V_t \ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right] \quad I.9$$

I.8.2.3 La courbe courant-tension

La variation du courant que produit une cellule Photovoltaïque en fonction de la tension à ses bornes représente la courbe caractéristique de la cellule. Cette courbe est établie dans des conditions de test standard, dite STC « Standard Test Conditions » (éclairage de 1 KW/m², Répartition spectrale du rayonnement AM 1.5, Température ambiante 25°C). A noter que le spectre 1.5 AM correspond au spectre de la lumière solaire après qu'elle ait traversé une épaisseur d'air pur correspondant à 1.5 fois l'épaisseur de l'atmosphère.

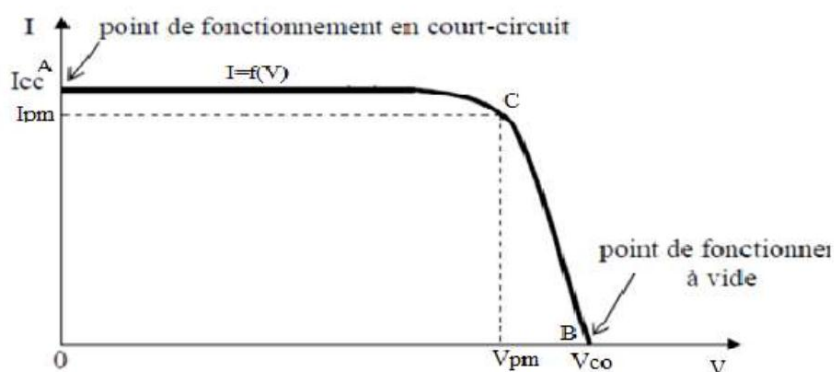


Figure I.6: Courbe caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule PV

- ✓ Point (A) correspond au courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension zéro (courant de court-circuit).
- ✓ Point (B) correspond à la tension maximale de la cellule solaire sans charge (conditions circuit ouvert).
- ✓ Point (C) correspond à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire.

I.8.2.4 Puissance de la cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique $P(W)$ disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = VI \quad \text{I.10}$$

$P(w)$: Puissance fournie par la cellule PV.

$V(V)$: Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I(A)$: Intensité débitée par la cellule PV.

I.8.2.5 Puissance maximale d'une cellule PV

Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque
 Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$p_{max} = V_{co} I_{cc} \quad \text{I.11}$$

$P_{max} (W)$: La puissance fournie par la cellule PV

$V_{co}(V)$: La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV

$I_{cc} (A)$: L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" figure I.7, et la tension au point de puissance maximale $V_{p_{max}}$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni $I_{p_{max}}$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{cc} . L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$p_{max} = V_{p_{max}} \cdot I_{p_{max}}$$

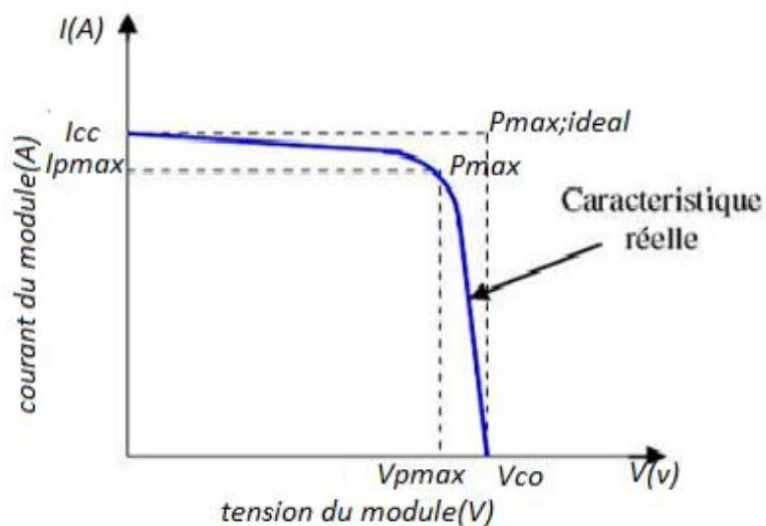


Figure I.7: Puissance maximale idéale et pratique

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par la cellule photovoltaïque, les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV, ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques et leurs applications.

Chapitre II: Bobines planaire pour les convertisseurs de puissance DC-DC

II.1 Introduction

Aujourd'hui, le système de conversion de l'énergie solaire en électricité souffre encore d'un manque d'amélioration qui en fait des systèmes coûteux avec de faibles performances et des équipements très lourds.

Comme vu précédemment, le PV a des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points d'énergie maximum. Ces propriétés dépendent également du niveau de luminosité et de la température de la ruche.

De plus, la valeur de la puissance nominale fournie par le GPV est très différente de celle réellement transmise à la charge. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser le plancher d'équilibre entre la puissance PV et la charge pour extraire la puissance maximale disponible à chaque instant dans les stations PV et la transférer à prix coûtant. Cette masse joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant que la puissance maximale fournie par le générateur est transmise à l'aide du système de contrôle utilisé à cet effet. Dans notre cas, notre salle adaptative associée est un convertisseur DC-DC.

Dans ce deuxième chapitre, nous nous intéressons au profil du convertisseur BOOST pour la puissance photovoltaïque. Les bobines spirales planaires sont connues comme les meilleures alternatives aux bobines conventionnelles qui peuvent réduire la taille des transformateurs, et pour cette raison on calcule la valeur électrique de la bobine et les paramètres techniques de cette bobine. Par lequel il peut être appliqué au logiciel COMSOL

II.2 Présentation du micro-convertisseur

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle qu'on a de bons rendements pour les hacheurs.

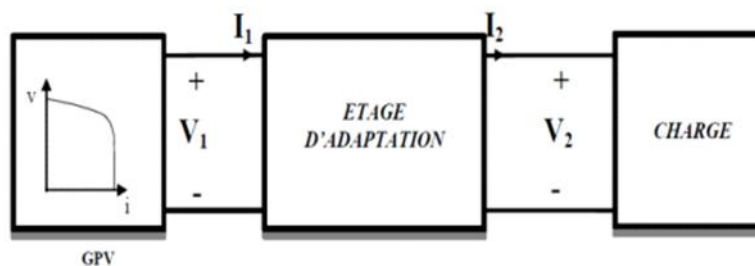


Figure II.1 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

Nous avons intéressé dans mes travaux c'est Le convertisseur élévateur DC/DC sera placé à l'arrière du module PV avec une épaisseur ne dépassant pas 3 cm. Sa spécification est définie comme suit : Le convertisseur BOOST DC/DC agit comme un intermédiaire entre le module PV et l'onduleur DC/DC (Fig. II. 2). Son rôle est d'augmenter la tension continue de 24V reçue par le module PV à une tension continue de 220V. Cette tension sera convertie par l'onduleur en tension alternative:

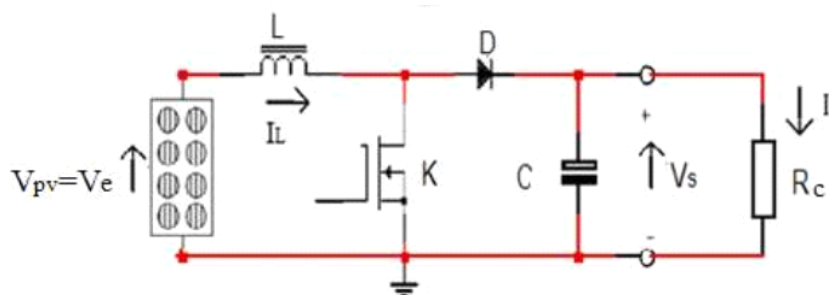


Figure II.2: Schéma de principe d'un convertisseur BOOST élévateur de tension

II.2.1 Cahier des charges de convertisseur BOOST

- Une tension d'entrée : $V_e = 24$ Volts.
- Une tension de sortie : $V_s = 220$ Volts $\pm 2\%$
- Une puissance de sortie : $P_s = 500$ watts
- Une fréquence de fonctionnement : $f = 1$ MHz

II.2.2 Principe de fonctionnement d'un élévateur de tension

Pour régler la transmission de puissance de l'entrée vers la sortie, une commande est appliquée à l'interrupteur **K** avec une période **T** (le rapport cyclique α). Le principe de fonctionnement est basé sur deux états distincts: Comme mentionné ci-dessus, le convertisseur élévateur est contrôlé par les commutateurs **K** et **D** qui fonctionnent alternativement.

Il y a deux états des interrupteurs défini comme suite :

État passant ($0 < t < \alpha T$)

Lorsque l'interrupteur k est fermée (le cas de 0 à αt), cela augmente le courant dans l'induction, stockant ainsi une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. Ensuite, la diode D est interdite et la charge est séparée de la source d'alimentation. Le circuit électrique résultant est (figure II.3).

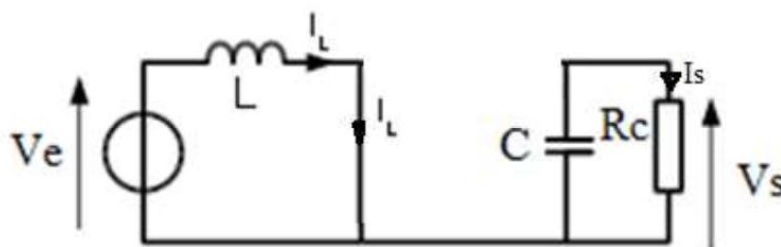


Figure II.3: Interrupteur K passant

$$V_e = V_L \Leftrightarrow V_e = L \frac{dI_L}{dt}$$

$$V_e dt = L dI_L \Leftrightarrow \int_0^{\alpha T} V_e dt = \int_{I_{Lmin}}^{I_{Lmax}} L dI_L$$

$$V_e \alpha T = L \Delta I_L$$

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{L.F} \tag{II.1}$$

État bloqué ($\alpha T < t < T$)

Lorsque l'interrupteur K est ouvert (état interdit de αT vers T), l'énergie stockée dans l'inductance contrôle le passage du courant dans la diode qui devient occupée (Fig. II.4)

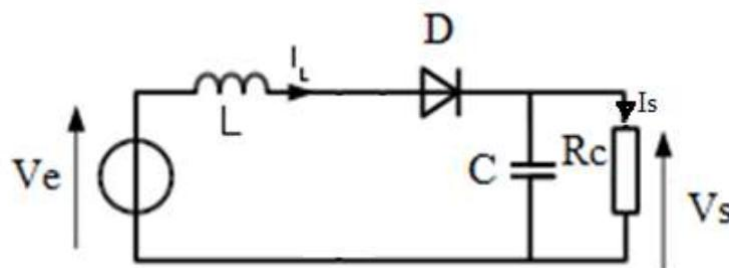


Figure II.4: Interrupteur K bloqué

$$V_e = V_s + V_L$$

$$V_e - V_s = L \frac{dI_L}{dt}$$

$$(V_e - V_s)dt = LdI_L$$

$$\int_{\alpha T}^T (V_e - V_s)dt = \int_{I_{Lmin}}^{I_{Lmax}} LdI_L$$

$$(V_e - V_s)(T - \alpha T) = L(I_{Lmax} - I_{Lmin}) = L\Delta I_L$$

$$\Delta I_L = \frac{(1 - \alpha)(V_e - V_s)}{L.f} \tag{II.2}$$

La figure II.2 présente les différentes formes d'ondes en mode de conduction continue des tensions et courants.

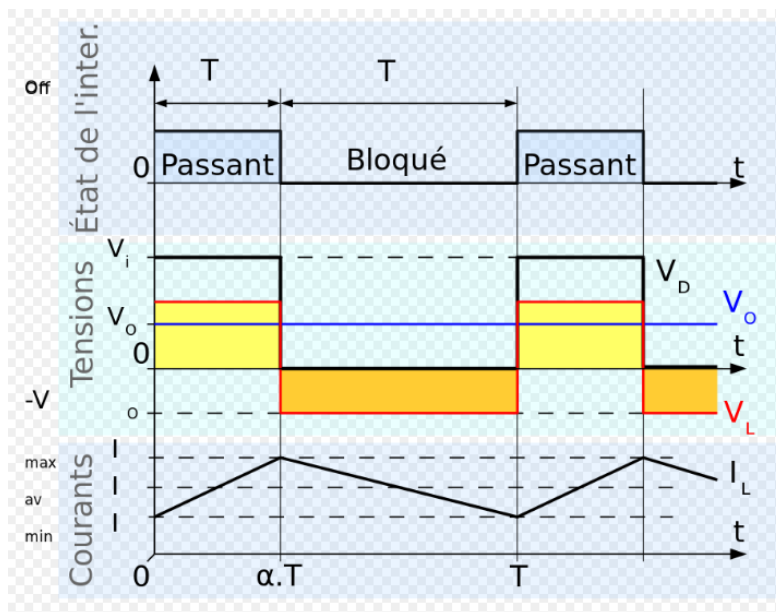


Figure II.5 : Les différentes formes d'ondes du convertisseur abaisseur

Pour calculer la valeur de l'inductance L, on prend en considération les deux états (passant et bloqué).

Étant donnée, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L.on} + \Delta I_{L.off} = 0$$

En remplaçant $\Delta I_{L.on}$ et $\Delta I_{L.off}$ par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{L.on} + \Delta I_{L.off} = \frac{(1-\alpha)(V_e - V_s)}{L.f} + \frac{\alpha V_e}{L.F} = 0$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha} \quad \text{II.3}$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle α augmente. C'est pour cela que l'on parle de survolteur (BOOST).

II.2.3 Calcul de la valeur de ΔI_L

Pour déterminer la valeur de l'ondulation de courant ΔI_L qui passe dans la bobine, il faut d'abord trouver les valeurs $I_{L,max}$ et $I_{L,min}$.

Afin de calculer la valeur de $I_{s,moy}$ nous avons la relation suivante :

$$P_s = V_s \cdot I_s \Leftrightarrow I_s = \frac{P_s}{V_s} \quad \text{II.4}$$

On remplace les valeurs de $P_s = 500$ watts et $V_s = 220$ V étant données par le cahier des charges, on trouve $I_s = 2.27$ A.

Puisque le courant moyen traversant le condensateur $I_{c,moy}$ est nul en régime permanent.

Donc, on déduit que :

$$I_{s,moy} = I_{L,moy} = 2.27 \text{ A}$$

Dans le cas critique, le courant minimal de l'ondulation qui passe par la bobine est nul, alors

$$I_{L,max} = 2 \cdot I_{L,moy} = 2 \times 2.27 \text{ A} = 4.54 \text{ A}$$

Donc, on peut déduire la valeur de l'ondulation en courant ΔI_L , on remplaçant les valeurs des $I_{L_{max}}$, $I_{L_{min}}$ dans l'équation II.2, on obtient $\Delta I_L = 4.54A$.

II.2.4 Calcul de la valeur de α

Par égalité entre (II.1) on (II.2) on trouve

$$\alpha = 1 - \frac{V_e}{V_s} \tag{II.5}$$

En utilisant les données du cahier des charges, et en appliquant l'équation (II.7), On trouve après calcul : $\alpha = 0.89$

II.2.5 Calcul de la valeur de l'inductance L

Pour calculer la valeur de L, on utilise l'équation II.1

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{L \cdot f} \Leftrightarrow L = \frac{\alpha V_e}{\Delta I_L \cdot f} = \frac{0.89(24)}{4.54(10^6)} = 4.7 \mu H$$

II.2.6 Calcul de la valeur la résistance R

Pour calculer la valeur de la résistance R(Ω), nous avons la puissance de sortie Ps est définie par la relation suivante.

$$P_s = R \cdot I_s^2 \Leftrightarrow R = \frac{P_s}{I_s^2} = \frac{500}{(2.27)^2} = 97,05 \Omega$$

II.2.7 Calcul de la valeur de la capacité C

Puisque la variation de Vs est linéaire, nous pouvons déduire l'expression de l'ondulation sous la forme :

$$\Delta V_s = \frac{I_s \cdot \alpha}{C \cdot f} \Leftrightarrow C = \frac{I_s \cdot \alpha}{\Delta V_s \cdot f} = 0.45 \mu F$$

$I_{L_{max}}(A)$	$I_s(A)$	P (W)	$R_s(\Omega)$	α	C(F)	L(H)
4.54	2.27	500	97,05	0,89	0,45 μF	4,7 μH

Tableau II-1 : Paramètres électriques du convertisseur Buck DC-DC

II.3 Les matériaux utilisés dans l'intégration des bobines[13][14][15][16]

Les matériaux pouvant être mis en œuvre dans l'intégration d'une inductance planaire se répartissent en trois familles en fonction de leurs propriétés physiques: les magnétique, les conducteurs et les diélectriques.

II.3.1 Les matériaux magnétiques

La présence d'un noyau magnétique dans la bobine permet d'augmenter la valeur d'inductance, pour guider le flux magnétique, et stocker de l'énergie.

Les caractéristiques optimales du matériau constituant ce noyau sont : Une perméabilité relative μ_r élevée permettant une augmentation significative de la valeur de l'inductance, un niveau d'induction à saturation B_0 élevé, une résistivité électrique élevée afin de limiter les «pertes fer» qui sont dues aux phénomènes d'hystérésis et de courants induits. et Une température de Curie élevée pour éviter la démagnétisation du matériau.

Aujourd'hui, les ferrites sont les matériaux magnétiques les plus utilisés en électronique de puissance. Les ferrites sont des matériaux à la base, des oxydes de fer (Fe_2O_4) qui en pratique sont mélangés avec d'autres constituants : le manganèse (Mn), le nickel (Ni) ou le zinc (Zn).

II.3.2 Les matériaux diélectriques:

Les matériaux diélectriques ou les isolants sont utilisés dans la réalisation des bobines spirales planaires pour isoler électriquement le conducteur au noyau magnétique ou du substrat. Parmi les matériaux diélectriques les plus utilisés pour l'intégration des bobines son: l'oxyde de silicium (SiO_2), l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), les nitrures de silicium et des polymères de type résines photosensibles ou polyamides.

II.3.3 Les matériaux conducteurs

Les matériaux conducteurs entrent dans le processus de réalisation des bobines planaires. Ce qui est va notamment intervenir dans la résistance électrique totale de la micro-bobine. Les conducteurs permettent également d'effectuer les interconnexions entre les différentes couches et les différents composants des circuits électriques. Les parties conductrices sont nécessairement soumises à des courants tournants qui génèrent des effets indésirables, tels que l'effet résistif, effet de peau, effet de proximité...etc. Le choix de ces matériaux est basé sur la bonne conductivité électrique, suivie par un coût modique, une adhérence sur le

substrat et une facilité de mise en œuvre (dépôt et gravure).Le tableau suivant présente les matériaux conducteur les plus utilisées dans le domaine de l'intégration.

Matériau	Conductivité σ [[Ωm] ⁻¹]	Épaisseur de peau δ à 1MHz [μm]	Prix (Mai 2017) [€ Kg ⁻¹]
Argent	$6,2 \times 10^7$	64	476,95
Cuivre	$5,9 \times 10^7$	65	5,06
Or	$4,5 \times 10^7$	75	36420,00
Aluminium	$3,8 \times 10^7$	82	1,75

Tableau II-2:Matériaux conducteur utilisés pour les micros- bobines

II.4 Les paramètres géométriques de la bobine planaire

II.4.1 Calcul de l'énergie stockée dans le noyau magnétique

Puisque nous avons déterminé la valeur de l'inductance de la micro- bobine, nous pouvons utiliser la relation suivante pour calculer l'énergie maximale stockée dans ce composant[17][18]

$$W = \frac{1}{2} L I_{L_{moy}}^2 \tag{II.6}$$

Avec une valeur d'inductance $L = 4,7 \times 10^{-6} H$ et de $I_{L_{moy}} = 2,27 A$, on trouve une énergie $W = 1,21 \times 10^{-5} j$.

II.4.2 La densité volumique d'énergie

Notre choix porte sur la famille des alliages NiZn son référence est C2050.

Référence	TC [°C]	μ_r	ρ [Ωm]	B_{sat} [T]	f_{max} [Hz]
C2050	340	100	10^7	0.37	70×10^7

Tableau II-3caractéristiques électriques et magnétiques du ferrite NiZn (CM48)[19]

Avant de déterminer le volume nécessaire du noyau magnétique utilisé de type *NiZn* référence **C2050**,[19] il faut connaître la densité volumique d'énergie le caractérisant. Pour

calculer cette densité volumique d'énergie dans un milieu de perméabilité ($\mu = \mu_0 \mu_r$), nous utilisons la relation suivante.

$$D_{v \max} = \frac{B_{\max}^2}{2\mu_0 \mu_r} \quad \text{II.7}$$

Avec une perméabilité relative $\mu_r = 100$ et perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/ m, et une induction à saturation $B_{\max} = 0.37$, nous obtenons une densité volumique d'énergie: $D_{v \max} = 545 \text{ J/m}^3$

II.4.3 Calcul du volume du noyau magnétique

La relation (II.8) nous permet de déterminer le volume du noyau ferromagnétique (NiZn) nécessaire pour une valeur de l'inductance $L = 4.7 \mu\text{H}$.

$$V_{\text{NiZn}} = \frac{W}{D_{v \max}} = \frac{1.21 \times 10^{-5}}{545} = 2.23 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \quad \text{II.8}$$

Pour assurer le stockage d'énergie, on ajoute 20% pour les pertes. On aura donc un volume total de $2.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3$.

Le noyau ferromagnétique qu'on va utiliser est donc conçu sous la forme d'un parallélépipède de section $S = 107 \text{ mm}^2$ et d'épaisseur $e = 0.25 \text{ mm}$ ce qui donne une longueur $L = 10.3 \text{ mm}$. S est la section sur laquelle nous allons poser notre spirale carrée représentant le circuit électrique de la micro-bobine.

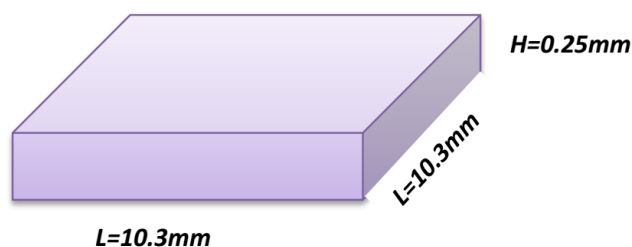


Figure II.6 : Modèle physique du noyau magnétique de la micro-bobine

II.5 Dimensionnement de la micro-bobine avec un noyau magnétique

Dans la littérature, les méthodes mathématiques les plus utilisées pour dimensionner les différents paramètres géométriques d'une bobine planaire spirale qui sont : la largeur des

spires w , l'espace inter-spaires s , l'épaisseur du conducteur t , le diamètre extérieur d_{out} , le diamètre intérieur d_{in} et la longueur du conducteur l_{moy} .

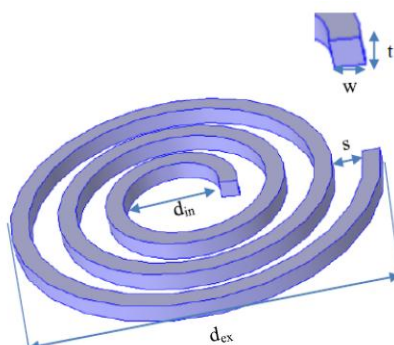


Figure II.7: Les différents paramètres constitutants

La formule donnée par Mohan pour le calcul de l'inductance est exprimée en fonction du diamètre moyen d_{avg} , du nombre de spires n et du facteur de forme ρ pour quatre géométries d'inductances différentes. Elle est donnée par la relation (II.9).[20]

II.5.1 Calcul du diamètre externe et interne

Pour calculer la valeur de l'une des diamètres on utilise le rapport C entre d_{out} et d_{in} est donné par équation II.9.

$$c = \frac{d_{in}}{d_{out}} \quad \text{II.9}$$

On suppose les valeurs initiales de notre géométrie carrée, pour $d_{out} = 9mm$ et $d_{in} = 1,5mm$

II.5.2 Calcul le diamètre moyen d_{avg} et du facteur de forme ρ

Le diamètre moyen d_{avg} et le facteur de la forme ρ sont donnés en fonction de d_{out} et d_{in} par équation II.10

$$d_{avg} = \frac{d_{in} + d_{out}}{2} = \frac{1,5 + 9}{2} = 5,25mm \quad \text{II.10}$$

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} = \frac{9 - 1,5}{9 + 1,5} = 0,71 \quad \text{II.11}$$

II.5.3 Calcul la valeur de n (nombre de spire)

La formule donnée par Mohan pour le calcul de l'inductance est exprimée en fonction du diamètre moyen d_{avg} , du nombre de spires n et du facteur de forme ρ pour quatre géométries d'inductances différentes. Elle est donnée par la relation (II.12).[20]

$$L \cong \frac{\mu n^2 d_{avg} c_1}{2} \left(\ln \left(\frac{c_2}{\rho} \right) + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \quad \text{II.12}$$

C_1, C_2, C_3, C_4 : Coefficients dépendants de la forme géométrique utilisée. Les valeurs de ces coefficients sont données dans le tableau II.4.

	c_1	c_2	c_3	c_4
Carrée	1.27	2.07	0.18	0.13
Hexagonale	1.09	2.23	0	0.17
Octogonale	1.07	2.29	0	0.19
Circulaire	1	2.46	0	0.20

Tableau II-4: Valeurs des coefficients utilisés par Mohan

Avec un diamètre externe $d_{ex} = 9\text{mm}$ et un diamètre interne $d_{in} = 1.5\text{mm}$, le rapport $c = d_{in}/d_{ex} = 0.17$, nous trouvons la valeur du et un nombre de spires $n = 3,00$

II.5.4 Calcul de la hauteur et la largeur du ruban conducteur

Pour calculer la largeur et l'épaisseur du conducteur (w, t), on doit tout d'abord connaître la valeur de l'épaisseur de l'effet de peau et de la densité de courant.

L'épaisseur de peau est donnée par la relation suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} \quad \text{II.13}$$

Dans la plupart du temps, on utilise le cuivre comme matériau conducteur pour la réalisation des bobines planaires cause de sa faible résistivité ($\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$), sa perméabilité magnétique $\mu_r = 1 \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H} / \text{m}$

Pour une fréquence de 1MHz. Le cuivre a une épaisseur de peau égale **65.62 μm**

La valeur moyenne de la densité du courant dans le cas d'un conducteur rectangulaire est donnée par équation II.14

$$j_{moy} = j_0 \frac{e^{-\frac{t}{2\delta}} + 1}{2} \tag{II.14}$$

Pour que le courant circule dans tout le conducteur, les conditions suivantes doivent être remplies : ou $W \leq 2 * \delta$ ou $t \leq 2 * \delta$. Donc, on a supposé que l'épaisseur : $t = 2\delta = 131,24 \mu m$.

La relation qui permet de calculer à partir de la section du conducteur

$$\begin{aligned} I_{Lmoy} &= A j_{moy} \\ A &= w.t \end{aligned} \tag{II.15}$$

On sait que la plupart des substrats sur lesquels sont réalisés les petits conducteurs sont en silicium. On choisit une densité de courant $j_0 = 10^8 A/m^2$

Si on prend $t=2* \delta$, donc la densité de courant moyen s'écrit comme suit :

$$j_{moy} = j_0 \frac{e^{-1} + 1}{2} = 0,68 j_0 = 0.684 \times 10^8 A / m^2 \tag{II.16}$$

$j_{moy} = 6,84 \times 10^7 A/m^2$, avec un courant $I_{Lmax} = 4,54A$, on obtient $A = 6,64 \times 10^{-8} m^2$ et donc d'après l'équation (III.15) la largeur $w = 506 \mu m$

II.5.5 Calcul de la distance inter-spires

À partir de notre forme géométrique circulaire de l'inductance, on utilise la formule (II.17) pour calculer la distance inter-spires (S).

$$s = \frac{d_{ex} - d_{in} - (2n + 1)w}{(2n - 1)} \tag{II.17}$$

$$s = \frac{d_{out} - d_{in} - 2wn}{2(n - 1)} = \frac{9000 - 1500 - 2 \times (506 \times 3)}{2(n - 1)} = 1116 \mu m$$

II.5.6 Calcul de la longueur moyenne

La longueur moyenne L_{moy} du conducteur dans une inductance spirale carrée est donnée par l'expression (II.18) :

$$L_{moy} = \frac{\pi}{2} [2nd_{in} + n(2n+1)w + n(2n-1)s] \quad \text{II.18}$$

$$L_{moy} = 4n[d_{out} - (n-1)s - nw] - s$$

D'où : $L_{moy} = 89,9\text{mm}$

II.6 Tableau récapitulatif du dimensionnement géométrique

Les résultats du dimensionnement géométrique, sont regroupés dans le tableau.

Paramètres géométriques	Résultats du dimensionnement
Le nombre de spire n	3
La longueur moyenne du conducteur L_{moy}	89,9 mm
Largeur du conducteur w	506 μm
Épaisseur du conducteur t	131,24 μm
Espacement inter-spices s	1116 μm
Diamètre externe de la spirale d_{ex}	9000 μm
Diamètre interne de la spirale d_{in}	1500 μm

Tableau II-5 Résultats du dimensionnement géométrique

En se basant sur les résultats de dimensionnement qui indiquent des valeurs en micromètres (μm) et en millimètres (mm), on peut conclure que notre bobine, avec une valeur d'inductance de $L = 4,7 \mu\text{H}$, présente un volume très réduit. Cela signifie que la taille physique de la bobine est relativement petite, ce qui peut être bénéfique dans certains cas où l'espace est limité ou lorsqu'une conception compacte est souhaitée. La petite taille de la bobine peut également avoir des avantages en termes de réduction des pertes d'énergie et d'interférences électromagnétiques. Cependant, il est important de noter que les performances et les caractéristiques spécifiques de la bobine doivent être évaluées en fonction des exigences du système dans lequel elle est utilisée.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par aborder le dimensionnement des éléments du convertisseur de puissance DC-DC, qui a pour fonction de convertir une tension d'entrée de 24V en une tension de sortie de 220V, avec une puissance de sortie de 500W. Le dimensionnement des éléments inclut notamment la sélection des composants tels que les

transistors, les inductances, les condensateurs, etc., en fonction des spécifications du convertisseur.

Ensuite, nous avons orienté notre attention vers l'intégration des bobines sur substrat en silicium, qui est notre objectif principal. Nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans ce processus, en mettant l'accent sur les matériaux conducteurs, magnétiques et isolants.

Ensuite, nous avons finalisé ce chapitre par le dimensionnement des paramètres géométriques de notre bobine intégrée. À cet effet plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour assurer un fonctionnement optimal du convertisseur de puissance DC-DC. Il convient de noter que le dimensionnement précis des paramètres géométriques de la bobine intégrée nécessite une analyse approfondie prenant en compte les spécifications du convertisseur, les contraintes de l'application, les caractéristiques du matériau utilisé, ainsi que d'autres facteurs pertinents. Des outils de simulation et de conception spécialisés sont souvent utilisés pour faciliter ce processus.

***Chapitre III: Simulation des effets
électromagnétiques de la bobine
dimensionnée***

III.1 Introduction

Le logiciel COMSOL Multiphasiques était l’outil utilisé pour effectuer les simulations électriques et magnétothermiques de la bobine spirale plane dimensionnée.

III.2 Le modèle physique de la bobine

Le tableau III.1 présente les dimensions de la micro-bobine dimensionnée.

Paramètres géométriques	Résultats du dimensionnement
Le nombre de spire n	3
La longueur moyenne du conducteur L_{moy}	89,9 mm
Largeur du conducteur w	506 μm
Épaisseur du conducteur t	131,24 μm
Espacement inter-spires s	1116 μm
Diamètre externe de la spirale d_{ex}	9000 μm
Diamètre interne de la spirale d_{in}	1500 μm

Tableau III-1: Paramètres géométriques de la bobine étudiée

La figure III.1 représente le modèle physique de la bobine plane circulaire avec un substrat ferromagnétique, il est composé de :

1. Bobine plane circulaire : C'est une structure en forme de disque mince, composée d'un matériau conducteur (généralement du cuivre) enroulé en une spirale. Cette bobine peut être représentée par une géométrie bidimensionnelle ou tridimensionnelle, selon les besoins de la simulation.
2. Substrat ferromagnétique : Il s'agit d'un matériau ferromagnétique utilisé comme support ou base pour la bobine. Le substrat ferromagnétique peut influencer les propriétés électriques et magnétiques de la bobine, notamment en modifiant les flux magnétiques et les pertes d'énergie.
3. Notations d'entrée et de sortie (A et B) : Ce sont les points de connexion de la bobine où les signaux électriques sont introduits (entrée) ou extraits (sortie). Ces notations permettent de définir les conditions aux limites appropriées dans le modèle, en tenant compte des connexions électriques à la bobine.

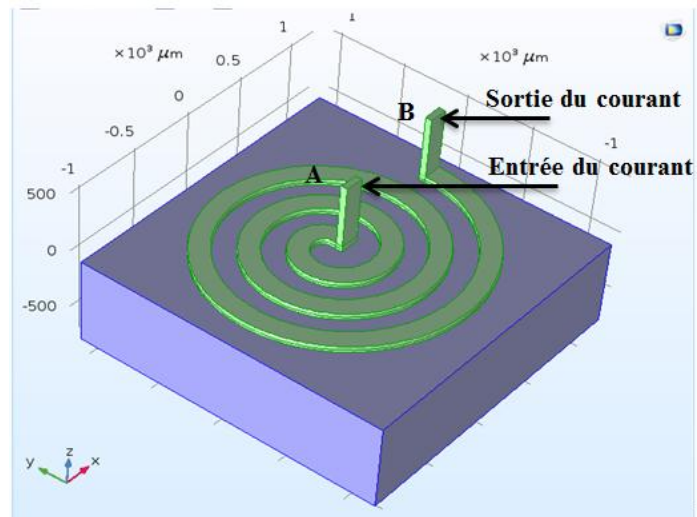


Figure III.1 Le modèle physique de la micro-bobine

III.3 Le maillage

Le maillage est basé sur la méthode des éléments finis. C'est une technique puissante pour la modélisation numérique, mais il est important de prendre en compte les contraintes de temps de calcul et de ressources lors du choix du maillage et de l'ordre de précision pour obtenir des résultats précis tout en maintenant une efficacité de calcul acceptable.

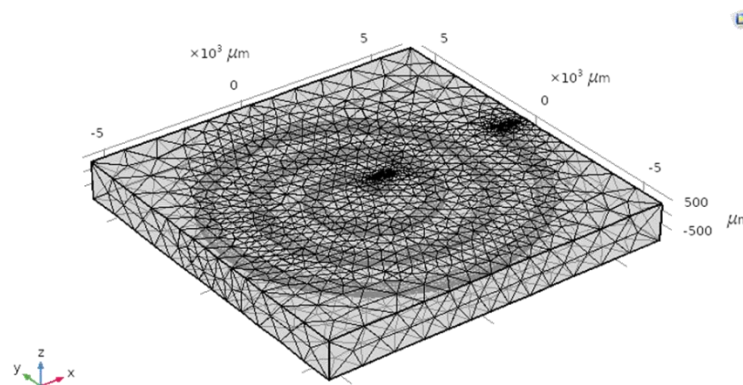


Figure III.2 : Le maillage du domaine d'étude

III.4 Simulation des paramètres électromagnétique de la micro-bobine

Dans ce chapitre, nous avons vu les résultats de simulation de différents effets électromagnétiques tels que: la distribution de la densité du flux magnétique et la

Chapitre III Simulation des effets électromagnétiques de la bobine dimensionnée

distribution des lignes de champ magnétique ainsi que la densité de courant dans la spirale conductrice.

III.4.1 Variation de l'inductance

Pour vérifier que la valeur mesurée de l'inductance concorde avec la valeur calculée analytiquement, nous avons tracé le graphique de la Figure III.3 montrant la variation de l'inductance en fonction de la fréquence.

Pour une fréquence de 1MHz qui est la fréquence de fonctionnement du convertisseur abaisseur, nous lisons une valeur d'inductance de 4.1×10^{-8} H. Nous remarquons cette valeur est proche de la valeur théorique de la bobine avec noyau magnétique qui est de l'ordre de 4.7×10^{-8} H. Notre géométrie est donc acceptable en termes de valeur d'inductance. Nous remarquons aussi que l'inductance de la spirale perd sa valeur lorsque la fréquence augmente.

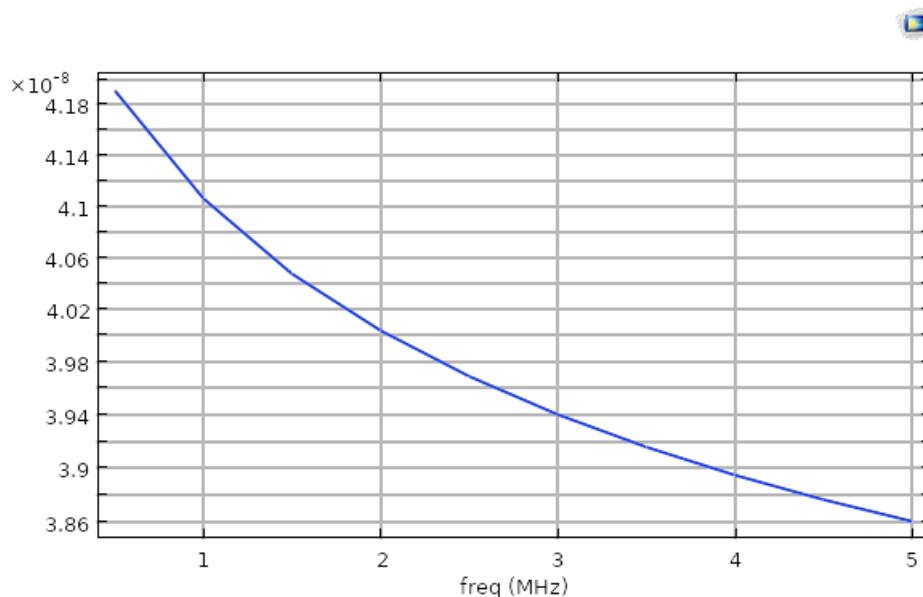


Figure III.3: Variation de l'inductance en fonction de la fréquence

Aux basses fréquences, l'inductance L atteint son maximum car la résistance est faible et constante.

III.4.2 Variation de la résistance

La figure III.4 représente la variation de la résistance d'une bobine en fonction de la fréquence en raison des effets de peau. À des fréquences plus basses, la résistance alternative peut être négligeable par rapport à la résistance de courant continu, mais elle devient de plus en plus importante à mesure que la fréquence augmente.

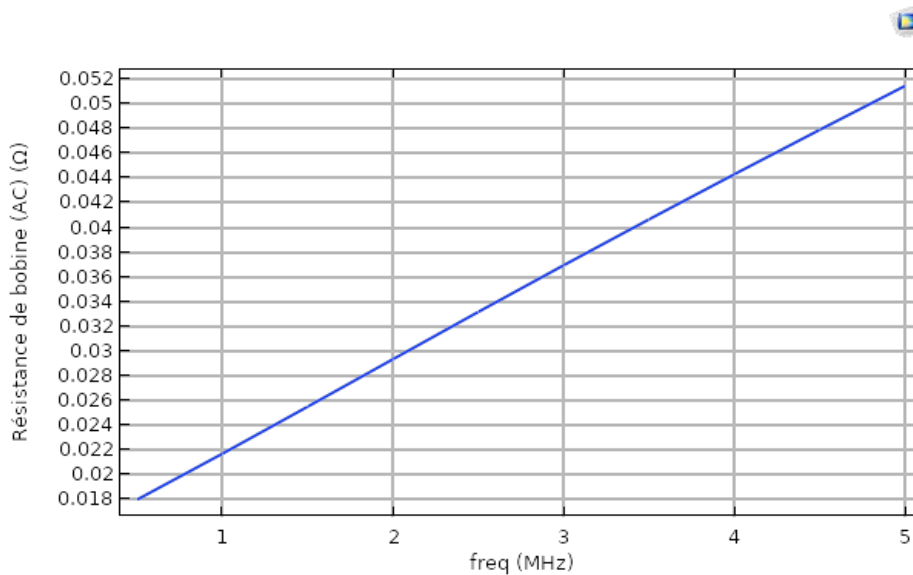


Figure III.4 : Variation de la résistance en fonction de la fréquence

III.4.3 Variation du facteur de qualité Q

Effectivement, la qualité d'une inductance est mesurée par son coefficient de qualité (Q), qui est défini comme le rapport entre l'énergie utile emmagasinée dans l'inductance et l'énergie perdue pendant une période donnée.

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energie.emmagasinée}}{\text{Energie.perdu.dans.une.période}} \quad \text{III.1}$$

Lorsqu'un courant circule à travers une inductance, celle-ci stocke de l'énergie magnétique dans son champ magnétique. Cependant, en raison de divers facteurs, tels que les résistances internes du matériau conducteur utilisé dans l'inductance ou les pertes par courants de Foucault, une partie de cette énergie est dissipée sous forme de chaleur. Le coefficient de qualité (Q) permet de quantifier cette relation entre l'énergie stockée et l'énergie perdue.

Mathématiquement, le coefficient de qualité (Q) peut être exprimé comme :

$$Q = 2\pi f (L/R) \quad \text{III.2}$$

Où :

Q est le coefficient de qualité, **f** est la fréquence propre de l'inductance, **L** est l'inductance de la bobine en (H) et **R** est la résistance totale de la bobine en ohms (Ω)

Chapitre III Simulation des effets électromagnétiques de la bobine dimensionnée

Un coefficient de qualité élevé indique que l'inductance à moins de pertes d'énergie et est donc plus efficace. La figure III.5 représente la variation du facteur de qualité en fonction de la fréquence.

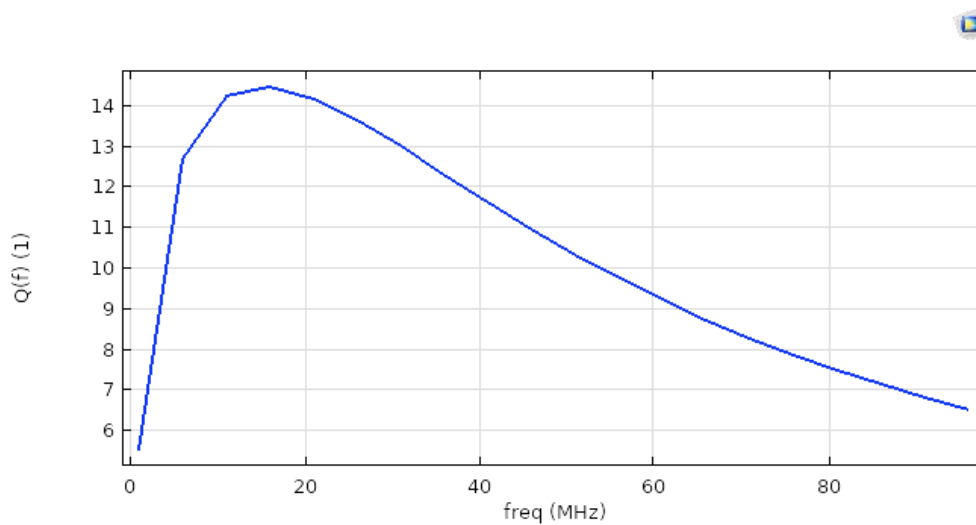


Figure III.5 : Variation de facteur de qualité en fonction de la fréquence

Nous remarquons que le facteur de qualité d'une bobine planaire a tendance à diminuer à mesure que la fréquence augmente en raison des pertes accrues, telles que les pertes par effet de peau et effet de proximité.

III.4.4 Distribution des lignes de champ magnétique

La simulation des lignes de champ magnétique permet de visualiser cette distribution et de comprendre comment le champ magnétique se propage dans l'environnement de la bobine. Cela peut aider à optimiser la conception de la bobine, à identifier les zones de perte de champ magnétique et à améliorer l'efficacité magnétique du système.

En comparant la valeur du champ magnétique indiquée sur la Figure III.6 ($<4,96 \times 10^{-3}$ Tesla) avec la valeur d'induction à saturation du matériau NiZn ($B_{\max} = 0,37$ Tesla), on peut observer que la valeur du champ magnétique simulé est bien inférieure à la valeur d'induction à saturation du matériau.

Cela suggère que le matériau NiZn utilisé dans la bobine n'est pas saturé dans les conditions de fonctionnement simulées. La non-saturation du matériau est généralement souhaitable car cela permet d'éviter une perte d'efficacité et une distorsion du champ magnétique dans la bobine.

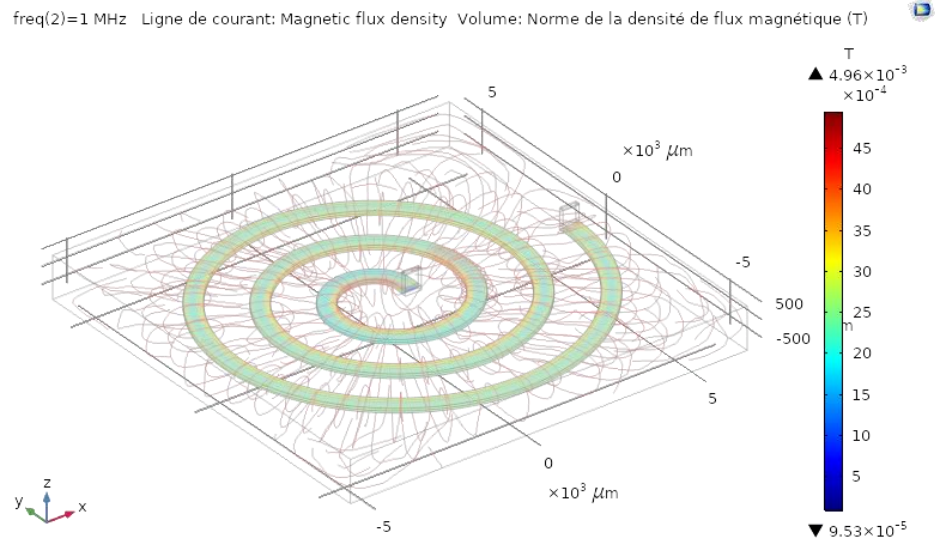


Figure III.6 : Distribution des lignes de champs magnétiques dans la bobine

III.4.5 Le flux magnétique

La figure III.7 montre la distribution de la densité de flux magnétique dans la bobine pour des différentes fréquences de 1KHz à 5KHz. Il est à noter que les spirales circulaires de la bobine enregistrent une valeur maximale du flux magnétique égale à 4.96×10^{-3} Tesla. Ce flux est maximal en raison de la concentration des lignes de champ magnétique dans cette région.

L'effet de la fréquence sur la densité de flux magnétique est enregistré sur le tableau suivant :

Fréquence(KHz)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Densité de flux magnétique ($\times 10^{-3}$)	4.96	5.19	5.31	5.36	5.36	5.33	5.27	5.20	5.03

Table 1 : Tableau de variation de la densité de flux suivant la fréquence

Il est intéressant de constater que la densité de flux augmente avec la fréquence jusqu'à atteindre un seuil correspondant à la fréquence de 3 kHz, après quoi elle diminue (figure III.7). Cette observation suggère l'existence d'un comportement non linéaire dans la relation entre la densité de flux et la fréquence.

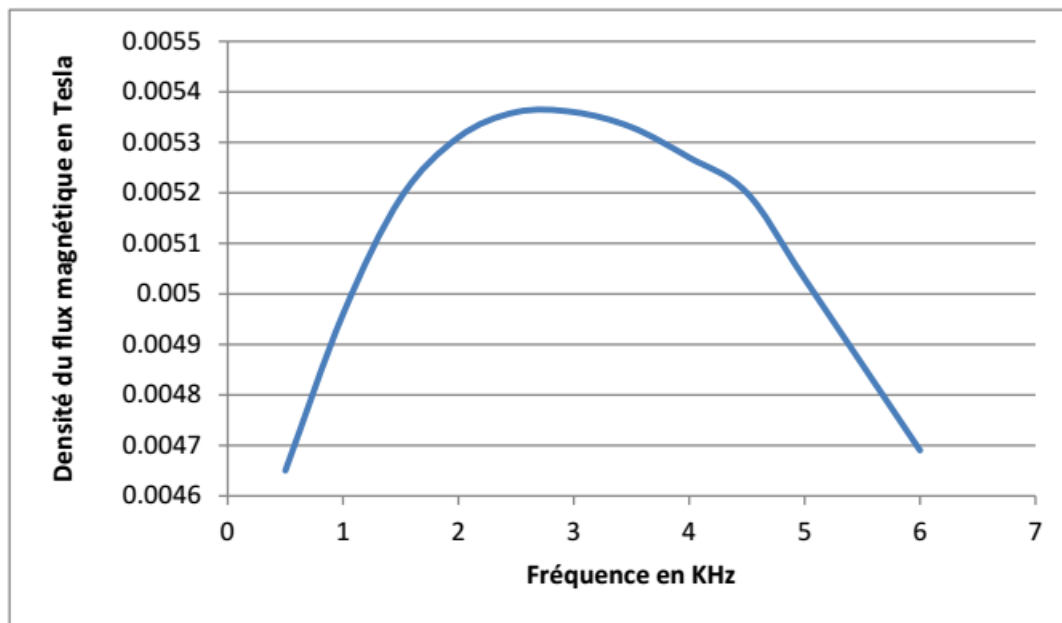


Figure III.7 :Variation des densités du flux suivant la fréquence du travail

Cette diminution peut être attribuée à des effets tels que l'augmentation des pertes par courants de Foucault ou des interactions indésirables entre les spires de la bobine à des fréquences élevées.

Il convient de noter que l'interprétation exacte de cette observation nécessite des études supplémentaires, notamment des simulations et des expérimentations, pourraient aider à mieux comprendre ce comportement non linéaire de la densité de flux en fonction de la fréquence.

Les figures III.8 et III.9 présentent une distribution de densité de flux magnétique à la fréquence de fonctionnement (1MHz). Ces deux graphiques confirment la concentration du flux magnétique dans les spires intérieures de la bobine et révèlent une valeur maximale précise de $4,47 \times 10^{-3}$ Tesla.

Cela signifie que la bobine est capable de générer un flux magnétique important dans ses spires intérieures, et la valeur maximale mesurée est de $4,47 \times 10^{-3}$ Tesla. Cette mesure précise démontre la puissance et l'efficacité de la bobine dans la génération du champ magnétique souhaité.

Il est important de noter que ces chiffres confirment nos observations antérieures et renforcent notre compréhension de la distribution du flux magnétique à l'intérieur de la bobine. Ces résultats peuvent avoir des implications significatives dans divers domaines qui

Chapitre III Simulation des effets électromagnétiques de la bobine dimensionnée

exploitent les propriétés magnétiques, tels que l'électromagnétisme, l'ingénierie électrique, la physique des matériaux, etc.

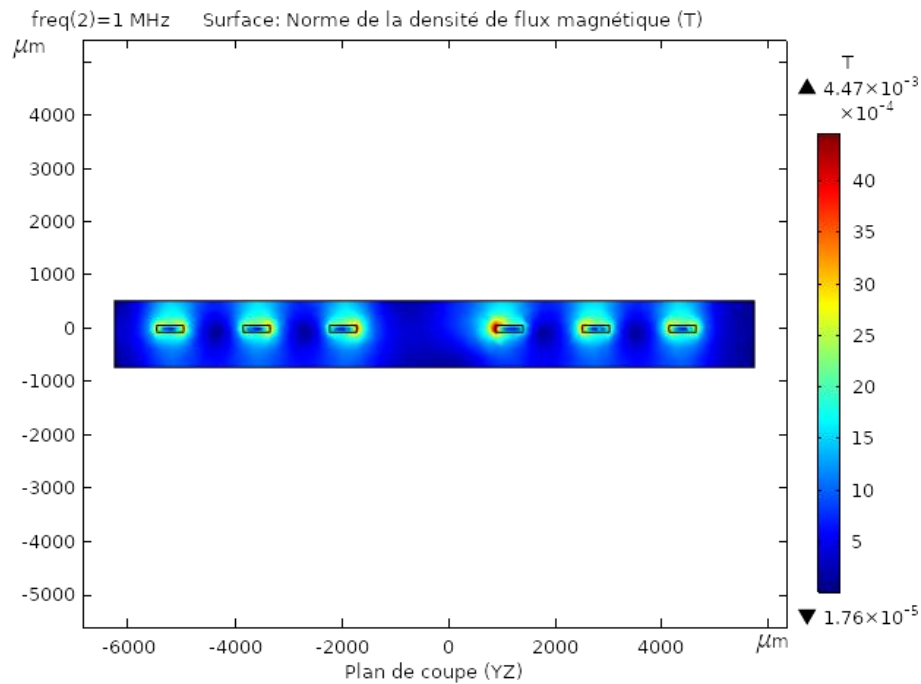


Figure III.8 : Coupe transversale de densité de flux magnétique

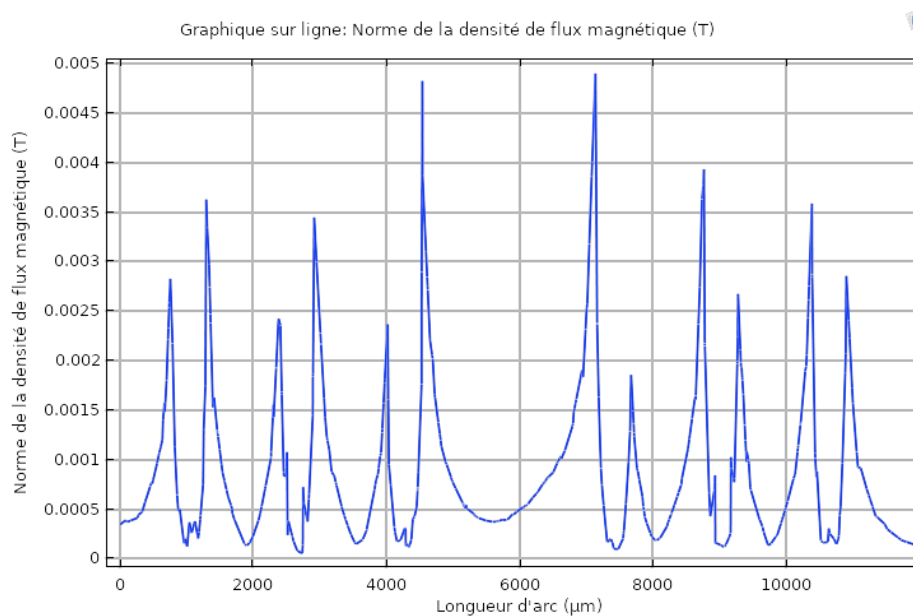


Figure III.9 : Évolution de la densité de flux suivant la longueur d'arc

III.4.6 La densité de courant

La Figure III.10 illustre la distribution de la densité de courant à l'intérieur des spires de la micro-bobine. En utilisant une coupe transversale de la bobine (Figure III.11), cette figure

Chapitre III Simulation des effets électromagnétiques de la bobine dimensionnée

permet d'étudier la répartition de la densité de courant à l'intérieur de la bobine selon l'axe de la coupe. Il est confirmé que l'effet de peau est absent, ce qui indique que le dimensionnement géométrique a réussi à éliminer ce phénomène. Cependant, un effet de proximité accentué est observé dans la spirale interne, comme mentionné précédemment. Cela peut être dû à la configuration spécifique de la bobine (spirale).

La Figure III.12 présente l'évolution de la densité de courant selon l'axe de la coupe. Il est possible de conclure que la densité de courant marque son maximal à la spire interne car le flux magnétique est maximale au centre de la bobine.

Ces informations fournies par les figures renforcent la compréhension du comportement magnétothermique de la micro-bobine et confirment l'efficacité du dimensionnement géométrique effectué. Elles permettent de mieux appréhender l'effet de peau et l'effet de proximité sur la distribution de la densité de courant dans la bobine.

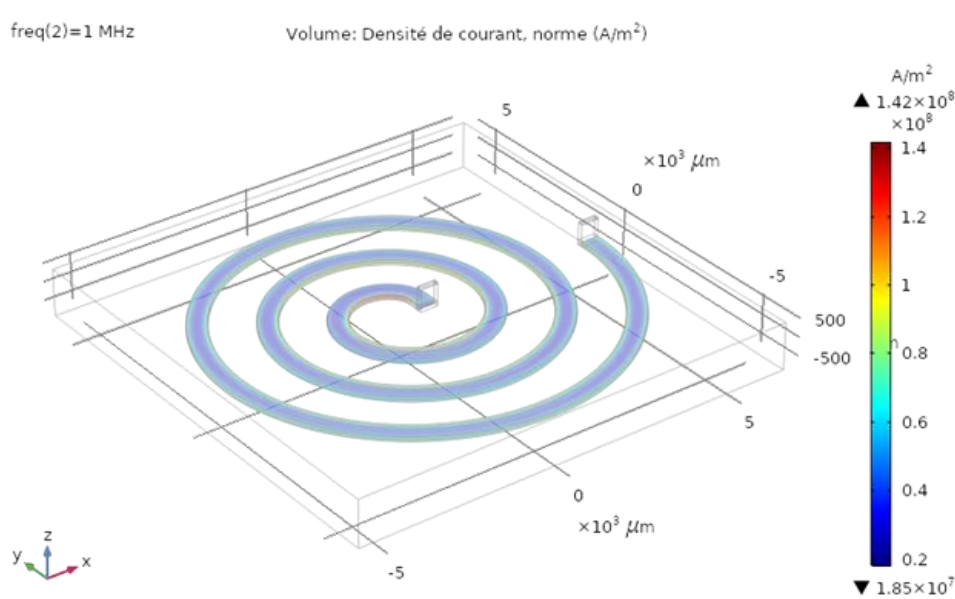


Figure III.10 : Densité de courant (volume) (1MHz)

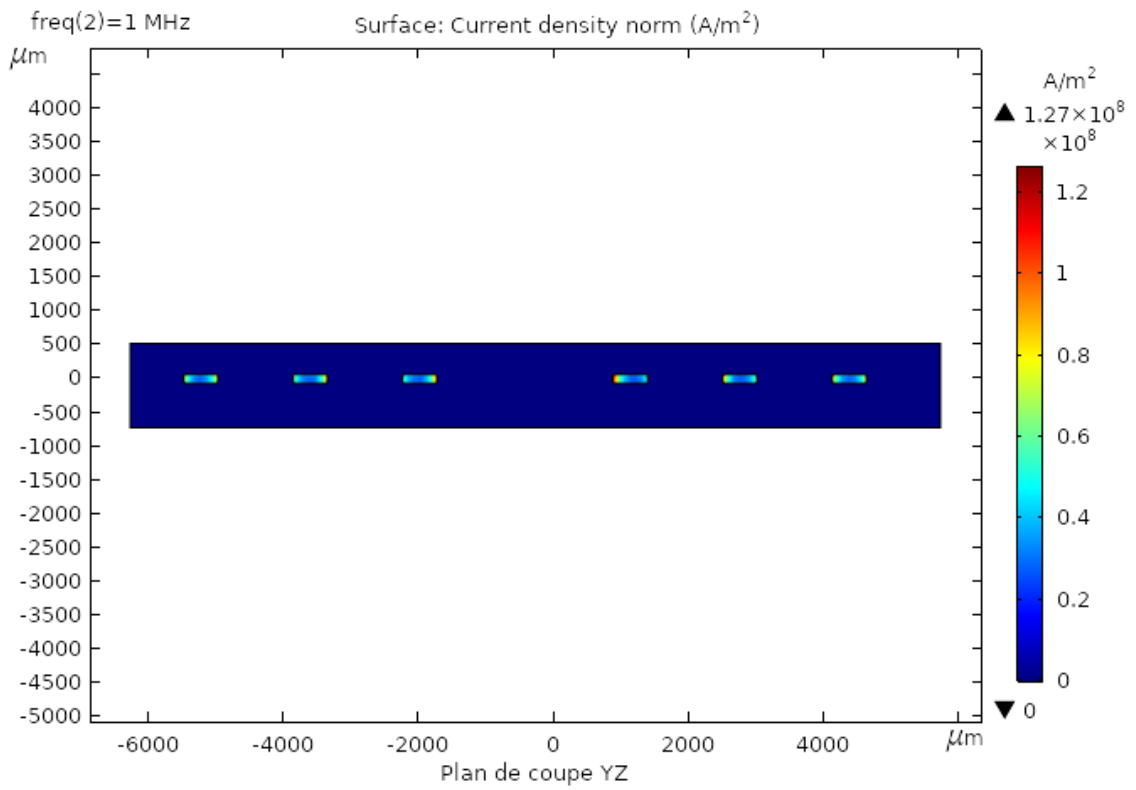


Figure III.11 : Densité de courant coupe transversale

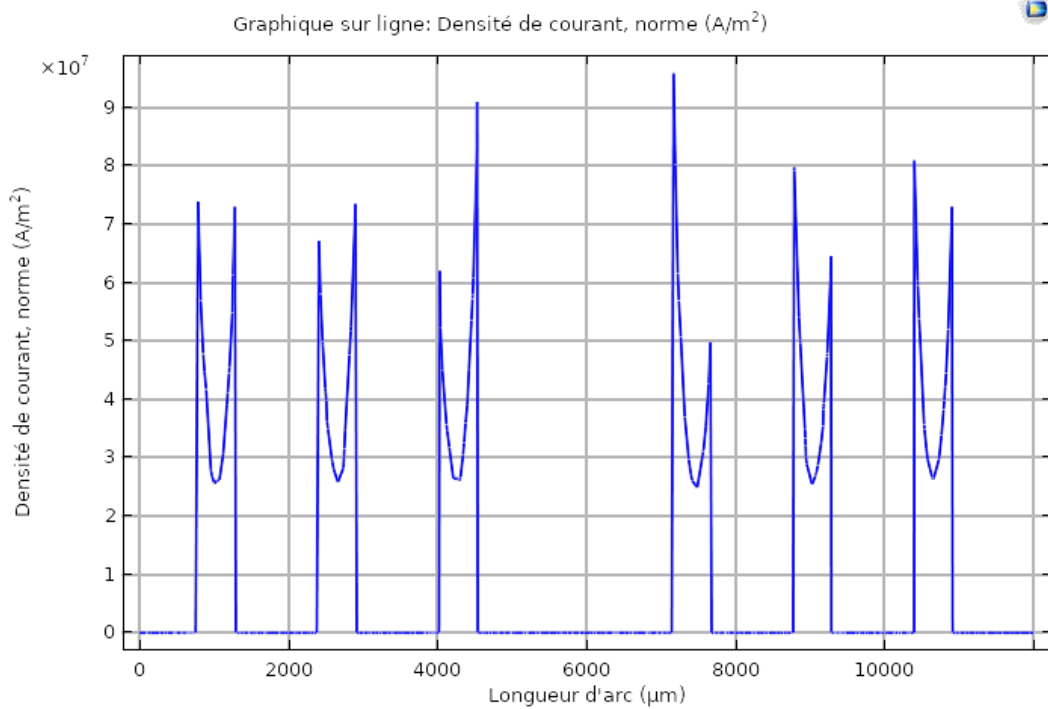


Figure III.12 : Répartition de la densité de courant suivant l'axe (OZ):

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la validation des résultats de la modélisation de la bobine intégrée pour le convertisseur DC-DC. Nous examinons également les effets électromagnétiques de la bobine spirale plane circulaire. Pour mener cette étude, nous utilisons le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. Nous présentons les résultats de différentes simulations qui portent sur l'influence des paramètres électromagnétiques sur la valeur de l'inductance intégrée. Nous analysons également l'impact de ces paramètres sur le comportement fréquentiel du facteur de qualité de cette inductance.

En utilisant COMSOL Multiphysics, nous avons pu modéliser la bobine spirale plane circulaire et simuler son comportement électromagnétique. Les simulations nous ont permis de mesurer l'inductance intégrée en fonction des différents paramètres électromagnétiques étudiés.

Les résultats obtenus à partir des simulations COMSOL Multiphysics nous ont permis de valider nos modèles et de comprendre l'impact des différents paramètres électromagnétiques sur la performance de la bobine intégrée. Ces informations sont essentielles pour optimiser la conception du convertisseur DC-DC et améliorer son efficacité globale.

Conclusion générale

Notre étude se concentre sur l'analyse des paramètres géométriques et électromagnétiques d'une bobine intégrée dédiée à une installation photovoltaïque. Nous visons à comprendre comment ces paramètres influencent les performances du système et à identifier les meilleures pratiques pour optimiser la conception et l'intégration de la bobine dans le système photovoltaïque. Les résultats de cette étude peuvent contribuer à l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité des installations photovoltaïques.

En simulant le comportement magnétothermique de la micro-bobine, nous pouvons analyser les distributions de champ magnétique à l'intérieur et à l'extérieur de la bobine, ainsi que les variations de la densité de courant induites par le courant électrique. Ces informations sont cruciales pour évaluer les performances de la bobine, notamment en termes d'efficacité énergétique, de dissipation thermique et de résistance aux surchauffes.

Nous avons constaté que les résultats de la simulation réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics montrent un comportement approprié de la densité du flux magnétique et une densité de courant admissible dans la micro-bobine dimensionnée. Ces résultats indiquent que le dimensionnement géométrique de la bobine est adéquat.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] A. DAOUD, “Contrôle de la Puissance d’un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire,” p. 140, 2013.
- [2] A. Mahmoudi and A. Djouambi, “d ’ énergie photovoltaïque République Algérienne Démocratique et Populaire Mémoire de fin d ’ études En vue de l ’ obtention du Diplôme de Master Spécialité: Génie Electrique Thème: Réalisation d ’ un convertisseur DC / DC dans une chaine de conversion ,” no. June, 2017.
- [3] B. ABDELFETTAH and A. AMJED, “Etude technicoéconomique d ’ une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla,” vol. Mémoire MA, 2020.
- [4] W. Guan, S. Long, M. Liu, Z. Li, Y. Hu, and Q. Liu, “Fabrication and charging characteristics of MOS capacitor structure with metal nanocrystals embedded in gate oxide,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 9, pp. 2754–2758, 2007, doi: 10.1088/0022-3727/40/9/012.
- [5] J. N. Burghartz *et al.*, “Integrated RF components in a SiGe bipolar technology,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 32, no. 9, pp. 1440–1445, 1997, doi: 10.1109/4.628759.
- [6] A. Ayang, “Diagnostic d’un système photovoltaïque à stockage par estimation paramétrique et commandes ADRC, intégré à une centrale autonome de cogénération d’énergie,” p. 235, 2020.
- [7] E. Hachemi, “Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd Faculté de Technologie Thèse Doctorat en Sciences en Électrotechnique Option: Commande électrique Contribution à la modélisation et à la commande d ’ un système de génération hybride Solaire-Eolien Présentée pa,” 2019.
- [8] A. Benattia, “Synthèse et Simulation de la Poursuite de Point de Puissance Maximale (MPPT),” *Mem. MAGISTER*, pp. 2009–2010, 2010.
- [9] A. Hania, “Commande d’un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV,” 2014.
- [10] M. Bekhti and T. A. Benattia, “Maximum Power Point Tracking Simulations for PV Applications Using Matlab Simulink,” *Int. J. Eng. Pract. Res.*, vol. 3, no. 4, p. 67, 2014, doi: 10.14355/ijep.2014.0304.01.
- [11] T. BARBIER, “Synthèse et caractérisation de nouveaux matériaux à permittivité

Bibliographie

- colossale.,” *These Dr. - Univ. François Rabelais Tours(France)*, 2012.
- [12] N. Houcine, “Etude de gestion d’une mini-centrale solaire et mise au point d’un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l’énergie électrique,” pp. 1–68, 2016.
- [13] S. Duguey, “Etude du cofrittage de matériaux diélectriques et magnétiques pour composants passifs intégrés.,” *Dr. Univ. -Sciences Technol. - Bordeaux I-France*, 2008.
- [14] S. Duguey, S. Duguey, and S. Duguey, “Etude du cofrittage de matériaux diélectriques et magnétiques pour composants passifs intégrés,” *These Dr. - Univ. Bordeaux I*, 2007.
- [15] F. KAHLOUCHE, “Fabrication et Caractérisation de Micro Transformateurs Planaires à Couches Magnétiques,” *Dr. l’université Jean Monnet Saint-étienne-France*, 2014.
- [16] M. Rabia, “Conception d’un nouveau modèle d’inductance intégrée,” *Thèse Dr. Univ. des Sci. Technol. d’Oran Mohamed*, 2013.
- [17] G. Troussier, “Integration de bobines sur silicium pour la conversion d ’ energie To cite this version :,” 2005.
- [18] T. Adda Benattia *et al.*, “Dimensioning and Realization of an LTCC Multilayer Capacitor for Energy Conversion,” *Trans. Electr. Electron. Mater.*, vol. 21, no. 6, pp. 564–579, 2020, doi: 10.1007/s42341-020-00207-x.
- [19] M. Semard, “Conception et réalisation de transformateurs intégrés pour les alimentations de faible puissance.,” *Energ. électrique. Univ. Lyon*, 2019.
- [20] S. S. Mohan, “The Design , Modeling and Optimization of on-Chip Inductor and Transformer Circuits.,” *These Dr. - STANFORD Univ.*, 1999.