



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industrie

Spécialité : Instrumentation et maintenance industrielle

Thème

Détection et Calcul des Paramètres Géométriques et Électriques des Bobines Planaires par Traitement d'Images

Présenté et soutenu publiquement par :

Houalef bouchra

Sadi kenza farah

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr Adda Neggaz		IMSI	Président
Guendouz Djilalia	Professeur	IMSI	Encadreur
Benazzouz Younes	Doctorant	IMSI	Co-Encadreur
Mme Lazreg Malika	MCA	IMSI	Examineur

Année Universitaire 2023-2024

REMERCIEMENTS

Avant tout nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage. A la suite, Nous tenons à remercier vivement notre co-encadrant M_r BENAZZOUZ Y. et notre encadrante M_{me} GUENDOUCZ D. notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements. Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, Nous remercions tous les professeurs de département d'Instrumentation Et à tous ceux qui furent à un moment ou à un autre, partie prenante de ce travail. Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.



Dédicaces :

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à:

Nos chers parents, qui nous ont toujours soutenus dans nos études.

A tous nos frères et sœurs chacun par son nom.

A toutes nos familles chacune par leur nom.

Et surtout à mon oncle



Résumé

Cette recherche se place dans le contexte du développement et de l'utilisation avancée des méthodologies de vision par ordinateur et de l'intelligence artificielle pour améliorer le traitement des données géométriques. Elle propose une méthode innovante combinant YOLO NAS et ROBOFLOW 3.0, deux concepts d'apprentissage profond qui utilisent des réseaux de neurones convolutifs (CNN) pour le traitement d'images en une seule passe. En parallèle, la bibliothèque OpenCV en Python est employée pour déterminer la géométrie des bobines planaires.

Les paramètres géométriques extraits sont cruciaux pour le calcul de l'inductance des bobines, un processus qui repose exclusivement sur ces données géométriques, selon la formule de Mohan. L'approche proposée présente plusieurs avantages notables : elle permet une accélération significative des processus de vérification et de calcul, tout en améliorant le contrôle qualité après la fabrication

Les mots clés :

Bobine planaire ,inductance ,traitement d'image, l'apprentissage approfondie, roboflow, intelligence artificielle, OpenCv

Summary:

This research is set within the context of the development and advanced use of computer vision and artificial intelligence methodologies to enhance geometric data processing. It proposes an innovative method combining YOLO NAS and ROBOFLOW 3.0, two deep learning concepts that utilize convolutional neural networks (CNNs) for image processing in a single pass. Simultaneously, the OpenCV library in Python is employed to determine the geometry of planar coils.

The extracted geometric parameters are crucial for calculating the inductance of the coils, a process that relies exclusively on these geometric data according to Mohan's formula. The proposed approach offers several notable advantages: it enables a significant acceleration of verification and calculation processes while improving quality control after manufacturing.

Keywords:

Planar coil, inductance, image processing, deep learning, Roboflow, artificial intelligence, OpenCV

المخلص

يندرج هذا البحث في سياق التطوير والاستخدام المتقدم لمنهجيات الرؤية الحاسوبية والذكاء الاصطناعي لتعزيز معالجة البيانات الهندسية. وهو يقترح طريقة مبتكرة تجمع بين YOLO NAS و ROBOFLOW 3.0، وهما مفهومان للتعلم العميق يستخدمان الشبكات العصبية التلافيفية (CNNs) لمعالجة الصور في مسار واحد. في الوقت نفسه، يتم استخدام مكتبة OpenCV في Python لتحديد معالم هندسة الملفات المستوية.

تُعد المعطيات الهندسية المستخرجة ضرورية لحساب محاتة الملفات، وهي عملية تعتمد حصرياً على هذه البيانات الهندسية وفقاً لمعادلة موهان. يقدم النهج المقترح عدة مزايا ملحوظة: فهو يتيح تسريع عمليات التحقق والحساب بشكل كبير مع تحسين مراقبة الجودة بعد التصنيع.

الكلمات المفتاحية:

الملف المستوي، الحث، الحث، معالجة الصور، التعلم العميق، روبوفلو، الذكاء الاصطناعي،
OpenCV

Dédicaces :	ii
Résumé:	iii
Introduction générale :	1
CHAPTRE 01: Notions Générales sur les composants passifs.....	
1. Introduction	
2.Le composant passif :	5
2.1 Qu'est ce qu'un composant passif ?	5
2.2 La résistance.....	5
2.3 Condensateur	6
2.4 Etat de l'art sur les bobines :.....	6
2.4.1 Historiques des bobines :	6
2.4.2 Définition de la bobine	7
2.4.3. Rôle de la bobine dans les circuits	7
3. Constructions de bobines :	8
3.1: bobine simple (monocouche) :	8
3.2 : bobine multicouche :	8
4. Les différents types de bobinage :	9
4.1 Inductance solénoïdale	9
4.2 Inductance serpentín.....	10
4.3 Inductance planaire spiral.....	10
4.4 Bobine toroïdale	102
5. Les bobines miniaturisées	12
5.1. Intérêt technologique de la miniaturisation	12
5.2. Miniaturisation de bobine solénoïdale.....	123
5.1. Miniaturisation de bobine toroïdale.....	124
6. Les effets électromagnétiques dans les conducteurs	14
6.1. Effet de peau.....	14
6.2. Effet de proximité.....	16
Conclusion	
CHAPITRE 2: Etat de l'art sur l'intégration des bobines planaires.....	
1.Introduction :	21
2.Aspects contextuels et l'importance des inductances planaires :	22
3. l'intégration des composants passifs :	22

4.les techniques de l'integration :	26
5.Methodes mathématique pour le calcul de l'inductance :	28
6.Les micro-bobines circulaires et leurs applications :	Erreur ! Signet non défini.
7. Les micro-bobines carrées et leurs applications	;;;31
8. L'influence du noyau magnétique sur les micro-bobines :	31

CHAPITRE 3 Les fondements de la vision par ordinateur de l' intelligence artificielle et algorithme

d'apprentissage.....	
...	
Introduction :	37
1. introduction a l'apprentissage automatique et l'apprentissage approfondi :	37
1.1 Définition de l'apprentissage approfondi :	37
1.2 Définition de l'apprentissage automatique:	38
1.3 Différence entre l'apprentissage automatique et l'apprentissage approfondi :	39
1.4 La vision par ordinateur :	39
1.5 Application et importance dans le contexte de la détection des objets et la classification des images :	40
2. les données d'entrainement du model AI :	41
2.1 La création des données synthétiques :	41
2.2 Architecture de l'apprentissage profonde :	42
2.3 La classification et la régression dans l'IA :	42
2.4réseaux neuronaux convolutifs :	44
2.5 Réseaux neuronaux récurrents (RNN) :	46
2.6 : la détection et la reconnaissance des objets :	47
2.6.1 Définition :	47
2.6.2 Modèles de détection par CNN :	47
A- R-CNN :	47
B- Fast R-CNN :	48
D- YOLO : You Only Look Once.....	48
3.Détection d'objets avec YOLO :	50
4.Avantages et inconvénients de YOLO :	50
Avantages de YOLO :	50
Inconvénients de YOLO :	51
5. Les outils de traitement d'images :	51
openCV :	51
Python :	52

6. caractéristique d'une image numérique :	52
6.1 Pixel :	52
6.2 Dimension :	53
6.3 Résolution :	53
6.4 Bruit :	53
6.5 Contours :	54
6.6 Luminance :	54
6.7 contraste :	55
6.8 Histogrammes :	55
6.8.1 Histogrammes des images niveaux de gris :	56
6.8.2 Histogrammes des images couleurs :	56
7. Filtrage :	57
7.1. Filtres linéaire.....	57
7.1.1. Filtre moyen :	57
7.1.2. Filtre gaussien :	58
7.2. Filtres non linéaire.....	58
7.2.1. Filtre médian :	58
7.2.2. Filtre maximum :	58
7.2.3. Filtre minimum :	59
7.3. Filtres morphologiques :	59
7.3.1. La délitation :	60
7.3.2. L'érosion :	60
7.3.3. L'ouverture :	60
7.3.4. La fermeture :	60
8. binarisation :	60
9. exemples d'applications concrètes du traitement d'images :	60
Conclusion :	61
CHAPITRE 4 Implémentation et résultats de l'extraction de la géométrie plane des bobines.....	
1. Environnement de Développement des données synthétiques	64
1.1. Définition de Visual code	64
1.2. Langage de programmation, le python	64
1.3. Utilisation de la bibliothèque turtle	64
2. Création du Données	64
2.1. Formes circulaires	65

2.2. Formes carrée	66
3 . Annotation des Images	67
3.1. Makesense.ai	67
3.2. Processus d'annotation	68
3.3. Format du fichier d'annotation	68
4. Préparation et Augmentation des Données	69
4.1 Définition de la Plateforme Roboflow	69
4.2 Chargement des Données	69
4.3 Division des Données	70
4.4 Augmentation des Données.....	71
5.L'entraînement des modèles et résultats	72
5.1Définitions des Critères d'Évaluation.....	72
5.2 Modèle Roboflow 3.0.....	73
5.3 Modèle YOLO NAS Small	73
6.1 Comparaison entre le modèle YOLO NAS Small et le modèle Roboflow 3.0.....	75
6.2 Démonstration Visuelle de la Performance des Modèles.....	75
7.Processus de traitement d'image des bobines.....	76
7.1 Conversion en Niveaux de Gris et Réduction du Bruit avec un Flou Gaussien.....	77
7.2Binarisation avec la Méthode de Seuillage d'Otsu.....	77
7.3 traçage de contour	78
8. Points d'Intersection et Calcul des Paramètres	79
9.Conversion des pixels en millimètres	80
10. Les paramètres géométriques obtenu	80
10.1. Validation des paramètres géométriques et de la valeur d'inductance.....	80
10.2 Interpretation des images et de tableau	82
Conclusion.....	82

Conclusion générale	84
Référence	85

Liste des abréviations

C.I: circuits intégrés

GPS :Global position system

SMT: surface mount technology

THT :through hole technology

IPD: integrated passive dvnices

SIP: system in package

EMI : Interférence électromagnétique

CAO: conception assistée par ordinateur

PCB: printed circuit board (circuit imprimé)

IA: intelligence artificielle

OCR: optical caractère recognition

CNN: convolutionel neural **neturoh**

GAN: generative adversarial natural

SVM: support vector machine

RNN: réseaux neuronal récurrent

YOLO: youonly look once

Liste des figures

Figure 1.1 1. Symbole d'une résistance fixe	5
Figure 1.1 2. Schéma d'une résistance électrique codée.....	5
Figure 1.1 3: Structure d'un condensateur	6
Figure 1.1 4:Figure d'une bobine réelle et son symbole	7
Figure 1.1 5: Les ballasts magnétiques	8
Figure 1.1 6: bobine simple (monocouche)	8
Figure 1.1 7: Inductance solénoïde sur substrat :	9
Figure 1.1 8: Inductanceméandre intégrée avec deux niveaux de matériau magnétique.....	10
Figure 1.1 9: Exemple d'inductance spirale de forme carrée.....	11
Figure 1.1 10: Différentes topologies spirales planaires	11
Figure 1.1 11: Forme rectangulaire	11
Figure 1.1 12: Bobine toroïdale	12
Figure 1.1 13: Diverses géométries de bobines.....	12
Figure 1.1 14:Bobine solénoïde miniaturisée.	13
Figure 1.1 15: Bobine toroïdale miniaturisée	14
Figure 1.1 16Effet de peau : densité du courant J (A/m ²) à différentes fréquences.....	15
Figure 1.1 17:La densité du courant en fonction de la fréquence.....	15
Figure 1.1 18:L'épaisseur de peau dans un conducteur cylindrique.	16
Figure 1.1 19:Exemple de l'effet de proximité direct	17
Figure 1.1 20:Exemple de l'effet de proximité direct, densité du courant J (A/m ²)	17
Figure 1.1 21:Exemple de l'effet de proximité inverse, densité du courant J (A/m ²)	17
Figure 1.1 22:Effet de proximité entre conducteurs coplanaires.....	18
Figure 1.1 23:Exemple de l'effet de proximité induit, densité du courant J (A/m ²).	18
Figure II. 1: Intégration des composants passifs [A].....	22
Figure II. 2:Intégration hybride des systèmes de l'électronique de puissance [A].....	27
Figure II. 3:intégration monolithique	27
Figure II. 4: Formes de bobines en spirale à une seule couche (carrée, circulaire, hexagonale et octogonale).....	29
Figure II. 5:Structures inductives planaires spirales Circulaire.	30
Figure III 3.1 1 : l'apprentissage approfondi.....	38
Figure III 3.1 2:les différents architecture d'apprentissage profonde	42
Figure III 3.1 3:classification dans l'AI.....	43

Figure III 3.1 4 : régression dans l'AI	44
Figure III 3.1 5:B.Représentation par couche convolutive	45
Figure III 3.1 6:Types pool.[42]	46
Figure III 3.1 7: Réseaux neuronaux récurrents	47
Figure III 3.1 8: Architecture de model R-CNN	48
Figure III 3.1 9: Architecture de model Fast R-CNN	48
Figure III 3.1 10: Chronologie des versions de YOLO (You Only Look Once)	49
Figure III 3.1 11: Architecture YOLO	49
Figure III 3.1 12: image numérique	52
Figure III 3.1 13:Représentation Pixels d'une image	52
Figure III 3.1 14: résolution d'un image	53
Figure III 3.1 15: image bruitée	54
Figure III 3.1 16: contour d'une image	54
Figure III 3.1 17:contraste d'une imag]	55
Figure III 3.1 18:image avec histogramme	56
Figure III 3.1 19 : exemple d'histogramme avec différents niveaux de gris	56
Figure III 3.1 20: Histogrammes des trois plants de l'image en couleur	57
Figure III 3.1 21: Exemple de filtrage d'une image bruitée (à gauche l'image d'origine, à droitel'image filtrée) [57].	57
Figure III 3.1 22: fonctionnement du filtre médian.	58
Figure III 3.1 23: fonctionnement du filtre maximum	59
Figure III 3.1 24 : fonctionnement du filtre minimum	59
Figure IV 1 : schéma de flux de démarche	64
Figure IV 2 :fenêtre de Visual Studio Code	65
Figure IV 3: les données synthétiques circulaires	66
Figure IV 4: les données synthétiques carrée	67
Figure IV 5:fenêtre de makesense.a	67
Figure IV 6:lesannotation des forme carrée et circulaire	68
Figure IV 7:Exemple d'un fichier d'annotation	68
Figure IV 8: Interface de Roboflow avec des données chargées.	70
Figure IV 9:Interface de Roboflow avec les données d'entraînement divisées.	71
Figure IV 10 :Interface de Roboflow montrant les informations d'augmentation et de prétraitement.	72
Figure IV 11: Graphe de précision du modèle Roboflow 3.0	73
Figure IV 12: Graphe de précision du modèle YOLO NAS Small	74
Figure IV 13: Détection d'une Bobine Circulaire par Roboflow 3.0	75
Figure IV 14: Détection d'une Bobine Carrée par Roboflow 3.0	75
Figure IV 15: Détection d'une Bobine Carrée par YOLO NAS Small	76
Figure IV 16:Détection d'une Bobine Circulaire par YOLO NAS Small	76
Figure IV 17:Photo du processus de capture des bobines planaires	77
Figure IV 18:Conversion en Niveaux de Gris de bobine circulaire	77
Figure IV 19:Binarisation d'une bobine circulaire	78
Figure IV 20:traçage de contour d'une bobine circulaire	78
Figure IV 21:mesure de géométries spécifiques et l'extraction de distances d'une bobine circulaire en pixels	79

Figure IV 22: Une référence pour le Calcul du ratio pixel-millimètre	80
Figure IV 23: mesure de géométries spécifiques et l'extraction de distances d'une bobine circulaire en mm avec le calcul d'inductance.....	82
Figure IV 24 :mesure de géométries spécifiques et l'extraction de distances d'une bobine carrée en mm avec le calcul d'inductance.....	82

Liste des Tableaux

Tableau 1– Coefficients pour le calcul analytique de l'inductance.	29
Tableau 2 : Le ratio pixel-mm obtenu est utilisé pour convertir les valeurs de différents paramètres des spirales pour toutes les formes capturées.	81
Tableau 3 : Comparaison des paramètres géométriques et des valeurs d'inductance : Validation entre les valeurs extraites du logiciel CAO et les résultats calculés avec OpenCV	81

Introduction générale

Les bobines planaires, ou inductances planaires, sont des composants essentiels dans le domaine de l'électronique moderne, conçus pour être intégrés directement sur des circuits imprimés (PCB). Leur structure plane permet de réaliser des inductances dans un format compact, offrant ainsi une solution efficace pour une multitude d'applications électroniques. Contrairement aux bobines traditionnelles, qui sont souvent volumineuses et nécessitent un espace significatif sur le PCB, les bobines planaires sont appréciées pour leur taille réduite et leur capacité à fonctionner à des fréquences élevées. Cette combinaison de compacité et de performance les rend particulièrement adaptées aux dispositifs électroniques modernes qui exigent à la fois une miniaturisation poussée et une haute efficacité.

Les applications des bobines planaires sont diverses et couvrent de nombreux domaines technologiques. Elles sont couramment utilisées dans les systèmes d'alimentation, tels que les convertisseurs de puissance, où elles jouent un rôle crucial dans le filtrage et la gestion des signaux électriques. En outre, ces bobines sont intégrées dans les dispositifs de communication sans fil, où elles aident à stabiliser et à améliorer les performances des transmissions de données. Leur utilisation s'étend également à d'autres technologies nécessitant des composants à la fois compacts et performants, ce qui témoigne de leur importance dans la conception de circuits électroniques avancés.

Avec l'évolution rapide des technologies de fabrication et d'analyse, le développement de nouvelles méthodologies basées sur la vision par ordinateur et l'intelligence artificielle (IA) offre des opportunités significatives pour améliorer la précision et la vitesse de traitement des données géométriques associées aux bobines planaires. La capacité à automatiser la détection et l'analyse des paramètres géométriques est cruciale pour garantir des performances optimales et une qualité élevée des composants produits. Les techniques modernes permettent de surmonter les limites des méthodes traditionnelles, offrant des solutions plus rapides et plus précises pour la mesure et la vérification des dimensions des bobines.

L'objectif de cette recherche est de développer une méthode avancée qui combine un modèle d'apprentissage profond, et OpenCV, une bibliothèque Python dédiée au traitement d'images.

Le sujet de ce mémoire se concentre sur la détermination automatique des paramètres géométriques des bobines planaires. Ces paramètres sont essentiels pour le calcul précis de l'inductance, qui est déterminé en utilisant la formule de Mohan. Cette formule repose exclusivement sur les dimensions géométriques des bobines, rendant leur mesure précise cruciale pour obtenir des valeurs d'inductance fiables. En intégrant des technologies

Introduction générale

avancées pour automatiser ce processus, la recherche vise à améliorer la précision et l'efficacité de la vérification des bobines après leur fabrication.

La pertinence de cette méthode combinant YOLO, Robotflow et OpenCV réside dans sa capacité à accélérer considérablement le processus de vérification et de calcul. Les techniques automatisées proposées permettent non seulement d'accélérer le calcul de l'inductance, mais aussi d'améliorer le contrôle qualité des bobines planaires. En garantissant des mesures géométriques rapides et précises, cette approche répond aux besoins croissants d'efficacité et de fiabilité dans le secteur de l'électronique.

La méthodologie adoptée dans ce mémoire se divise en deux phases principales.

Phase 1: Cette phase initiale se concentre sur l'entraînement des modèles de détection. Le modèle YOLO NAS et Robotflow3.0 sont entraînés pour identifier deux formes des bobines circulaires et carrées dans les images. Pour ce faire, un jeu de données synthétiques est généré en utilisant la bibliothèque Turtle en Python. Ce jeu de données simule différentes formes de bobines planaires, telles que carrées et circulaires, afin de préparer les modèles à reconnaître ces formes dans des conditions variées. L'objectif est de permettre aux modèles de détecter et de classifier les bobines planaires avec une haute précision.

Phase 2 : Une fois les bobines détectées, OpenCV est utilisé pour extraire les paramètres géométriques des bobines planaires identifiées. La conversion des dimensions en pixels en millimètres est effectuée à l'aide d'une méthode basée sur un rapport, permettant ainsi de traduire les mesures obtenues en unités de dimension réelles. Enfin, les dimensions géométriques extraites sont utilisées pour calculer l'inductance selon la formule de Mohan, fournissant ainsi une estimation précise des caractéristiques électriques des bobines.



Chapitre 1

Notions Générales sur les composants passifs

Chapitre 1

Notions Générales sur les composants passifs

1.Introduction

Les composants passifs et actifs sont les éléments clé de la micro électronique et l'électronique de puissance, leurs utilisations diffèrent selon leur niveau de puissance. Dans ce chapitre on se propose d'aborder des généralités sur les composants passifs puis les composants passifs miniaturisés en vue de leur intégration dans des microstructures. Dans ce chapitre, nous explorerons le monde fascinant des composants passifs dans les circuits électroniques. Les composants passifs sont des éléments essentiels qui ne produisent pas d'amplification de signal, mais jouent un rôle crucial dans la manipulation et la gestion du courant électrique. Nous commencerons par examiner en détail ce qu'est un composant passif, en mettant particulièrement l'accent sur la résistance, qui est l'un des composants les plus fondamentaux de cette catégorie.

Ensuite, nous entamerons le domaine des bobines, un élément clé des circuits électriques. Nous discuterons du rôle crucial de la bobine dans les circuits, ainsi que des différentes constructions de bobines, allant des simples bobines monocouches aux bobines multicouches plus complexes. De plus, nous explorerons les divers types de bobines, notamment l'inductance solénoïdale, l'inductance en serpentín et l'inductance planaire spiral, en mettant en lumière leurs applications et leurs particularités.

Une attention particulière sera accordée à la miniaturisation des bobines, un aspect crucial dans la conception de circuits électroniques modernes. Nous examinerons les techniques de miniaturisation des bobines ainsi que quelques exemples concrets illustrant l'importance de cette pratique dans l'industrie électronique contemporaine.

Enfin, nous aborderons les effets électromagnétiques dans les conducteurs, en mettant en évidence l'effet de peau et l'effet de proximité, qui peuvent avoir un impact significatif sur les performances des circuits électroniques.

À travers cette exploration approfondie des composants passifs et de leur fonctionnement dans les circuits électriques, nous espérons offrir une compréhension claire et détaillée de ces éléments essentiels de l'électronique moderne.

2. Le composant passif :

2.1 Qu'est ce qu'un composant passifs ?

En électronique, un composant passif est un élément qui ne produit pas d'énergie, mais qui est utilisé pour stocker, filtrer ou réguler le courant dans un circuit électronique. Ces composants incluent des éléments tels que les résistances, les condensateurs et les inductances. Les résistances contrôlent le courant et la tension, les condensateurs stockent la charge pour stabiliser la tension, et les inductances absorbent et libèrent de l'énergie. En résumé, les composants passifs sont essentiels pour le bon fonctionnement des circuits électroniques en aidant à gérer l'électricité sans produire d'énergie.

Les exemples courants de composants électroniques passifs sont, les résistances, les condensateurs, les inductances, les varistances, les thermistances, les photorésistances, les potentiomètres, les capteurs de pression, les capteurs de température, etc.

2.2 La résistance

Une résistance électrique est un composant qui s'oppose au passage du courant électrique dans un circuit. Elle réduit la tension ($u(t)$) ou limite le courant ($i(t)$), absorbant de l'énergie et la dissipant sous forme de chaleur. Les résistances peuvent être fixes (figure 1.1.1) ou variables, offrant une valeur de résistance constante ou ajustable.

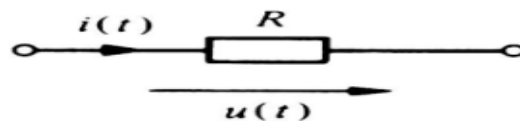


Figure 1.1 1. Symbole d'une résistance fixe

Les matériaux conducteurs utilisés, tels que le cuivre, l'argent, l'or et l'aluminium, déterminent la résistance au flux d'électrons. Les résistances à couche métallique ou de carbone sont marquées par des codes de couleurs pour indiquer leur valeur en ohms (figure 1.2). En électronique, choisir le bon type de résistance est crucial pour assurer la fiabilité et la stabilité des circuits, en fonction des besoins en puissance, précision et courant.

La résistance est mesurée en ohms (Ω) et est essentielle dans la conception de circuits électriques.



Figure 1.1 2. Schéma d'une résistance électrique codée

2.3 Condensateur

Un condensateur est un composant électrique qui stocke de l'énergie électrique. Il fonctionne en stockant l'électricité en fonction de la tension qu'il reçoit et en fonction de sa capacité.

Les condensateurs sont essentiels pour le bon fonctionnement des appareils électroniques, ils sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment pour stabiliser une alimentation électrique, traiter des signaux périodiques, et filtrer des courants alternatifs, pour cela, on les trouve dans de nombreux dispositifs de la vie courante, tels que les flashes photographiques et les alimentations continues. La figure 1.3 illustre la structure générale d'un condensateur.

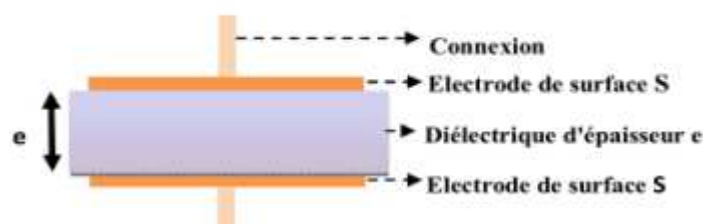


Figure 1.1 3: Structure d'un condensateur

2.4 Etat de l'art sur les bobines :

2.4.1 Historique des bobines

La bobine électrique a été inventée au milieu du 19^{ème} siècle. Les physiciens français Antoine Masson et Louis Breguet en ont fait les premiers essais en 1841. Dès 1836, Masson avait produit des courants sous haute tension en provoquant des interruptions rapides du courant d'une pile.[24][26][27].

En 1841, Masson et Breguet ont construit une bobine qui leur a permis de produire des décharges électriques dans des gaz raréfiés.

Le mécanicien allemand Heinrich Daniel Ruhmkorff a ensuite perfectionné le système pour les besoins de la physique expérimentale. C'est pourquoi on parle souvent de la "bobine de Ruhmkorff".

La bobine de Ruhmkorff fonctionnait comme un générateur électrique, capable de produire de très hautes tensions à partir d'une source de courant continu modeste. Elle était composée d'un enroulement primaire épais et d'un enroulement secondaire fin, permettant d'obtenir un effet d'induction électromagnétique.

Dès la fin du 19^{ème} siècle, la bobine de Ruhmkorff a été largement utilisée dans divers domaines, notamment la médecine pour alimenter des tubes à rayons X, la physique pour l'analyse spectroscopique, et les communications radio.[25]

2.4.2 Définition de la bobine

La bobine électrique est un composant courant en électrotechnique et électronique. Elle est constituée d'un enroulement de fil conducteur autour d'un noyau, souvent en matériau ferromagnétique. Les bobines peuvent être utilisées pour diverses fonctions telles que l'élimination des parasites, le raccourcissement d'antennes, l'accord en impédance de circuits, la création de filtres pour des fréquences spécifiques, le lissage des courants continus et le stockage d'énergie électromagnétique entre autres applications [f3].



Figure 1.1 4. Figure d'une bobine réelle et son symbole

2.4.3 Le rôle de la bobine dans les circuits

Une bobine peut être employée pour diverses fonctions, à savoir :

- Assurer l'élimination des parasites d'une alimentation électrique ou d'un signal analogique : elle lisse les courants continus (le bruit est éliminé) ou contrôle la croissance des courants dans les dispositifs d'électronique de puissance.
- Raccourcir une antenne, la bobine joue le rôle d'amplificateur de signal
- Accorder en impédance un circuit [6]
- Créer un filtre pour une fréquence ou une bande de fréquences particulière
- Stocker de l'énergie électromagnétique (W) ; magnétique en l'occurrence ; il faut alors que sa résistance soit très faible [7].

$$W = \frac{1}{2} L \times i^2 \quad (\text{équ N}^\circ 1)$$

En fait, dans le cas de bobine avec un noyau, l'énergie est entièrement stockée dans le champ magnétique dans le noyau de la bobine [8]. En comparaison, l'énergie électromagnétique est purement stockée dans le champ électrique d'un condensateur.

- Les bobines en supraconducteur, appelées SMES (Superconducting Magnet Energy Storage) sont utilisées comme ballasts magnétiques [9], pour l'éclairage par lampes à décharges (lampes fluorescentes, lampes aux halogénures métalliques, etc.). Dans ces applications, la bobine sert à générer un courant de haut voltage en pic: la tension n'est pas alternative mais elle est variable et n'est non nulle qu'un très court instant par rapport au moment où la tension est nulle, [10].

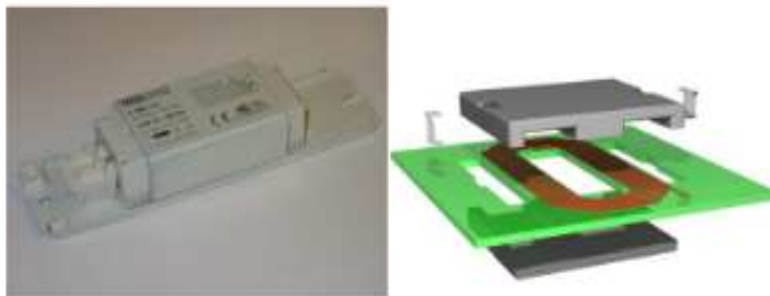


Figure 1.1 5: Les ballasts magnétiques

-Chargeur de batterie sans fil: des études récentes ont montré que, si l'on place l'un à côté de l'autre (c'est-à-dire dans le champ proche) deux circuits résonants (bobines) dimensionnés pour un minimum de pertes et d'absorption (facteur de qualité Q important) et résonnant à la même fréquence, la transmission de l'énergie entre l'émetteur et le récepteur est extrêmement efficace du fait d'un couplage d'ondes évanescentes [11].

3. Constructions de bobines :

3.1: bobine simple (monocouche) :

Une bobine simple est formée, en enroulant du fil de cuivre sur un cylindre de diamètre "D" et de longueur "L", le fil de cuivre a pour épaisseur "d" et est enroulé en formant "N" spires jointives. Les paramètres électrique de la bobine sont la self-inductance "L" et sa résistance interne "r" exprimés en général, en fonction de ses paramètres géométriques N, D, d, et γ la conductivité du cuivre. La tension aux bornes de la bobine [1] est donné part :

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (\text{éq. N}^\circ 2) \quad \text{où} \quad L = \mu_0 N^2 \frac{\pi D^2}{4 l} \quad (\text{éq. N}^\circ 3)$$

La figure 1.6 illustre une bobine à une couche d'enroulement :

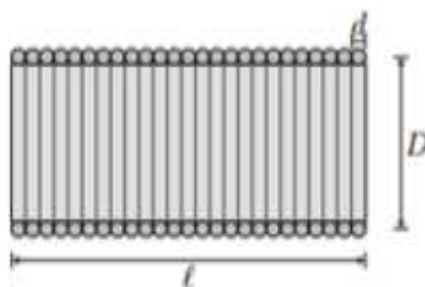


Figure 1.1 6: bobine simple (monocouche)

3.2 : bobine multicouche:

En examinant la relation précédente (equ.3), on se rend compte très vite que pour obtenir des valeurs d'inductances relativement importantes (disons à partir d'un mH) il faut bobiner un

très grand nombre de spires. On arrive alors relativement vite à des blocages (encombrement, échauffement) et de telles valeurs d'inductances doivent être considérées comme incompatibles d'un bobinage à une seule couche. Une première solution passe par la superposition de ces dernières.

Elle prend en compte l'épaisseur du bobinage et autorise de ce fait plusieurs couches. Malheureusement, cette relation est moins précise que la précédente et ce d'autant plus que le nombre de couches est élevé.

$$L = \mu_0 N^2 \frac{\pi D^2}{4 l} \quad (\text{éq. N}^\circ 4)$$

$$r = \frac{4ND}{\gamma d^2} \quad (\text{éq. N}^\circ 5)$$

4. Les différents types de bobinage :

D'une manière générale, une bobine est formée d'un enroulement conducteur dans l'air ou avec un noyau. L'enroulement peut s'effectuer autour du noyau, ce qui donne une structure solénoïdale ou inversement, le noyau ondule autour de l'enroulement, ce qui donne une forme en serpent. On trouve également une structure planaire où l'enroulement et le noyau sont au même niveau de surface plane.

4.1 Inductance solénoïdale

Une inductance solénoïdale est un type courant d'inductance qui se présente sous la forme d'une bobine de fil enroulée autour d'un noyau. Cela crée un champ magnétique lorsqu'un courant y circule, ce qui stocke de l'énergie sous forme magnétique. Ces inductances sont utilisées dans de nombreuses applications électroniques pour stocker et manipuler des signaux électriques. La figure 1.7 présente le schéma et la photographie d'inductance solénoïdale réalisée sur substrat [4] [f1].

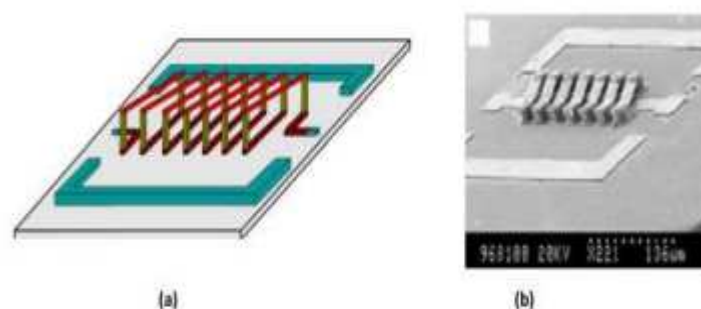


Figure 1.1 7: Inductance solénoïde sur substrat :

(a) Schéma d'illustration ; (b) photographie de l'inductance solénoïde réalisée sur substrat

La bobine solénoïdale est une géométrie de bobine très courante, utilisée par exemple pour les électro-aimants ou les antennes de récepteurs radio. Pour ce genre d'applications, les caractéristiques de la bobine solénoïdale sont les suivantes :

- Processus de production facile à l'aide de machines à bobiner
- Possibilité d'ajouter un noyau ferromagnétique pour augmenter l'inductance
- Bonne caractérisation grâce à des formules empiriques
- Capacité parasite élevée qui limite la fréquence maximale de fonctionnement
- Directivité élevée du champ magnétique

4.2 Inductance serpentín

Une inductance en serpentín est comme un chemin sinueux de fil conducteur sur une surface plate. Lorsqu'un courant électrique passe à travers ce chemin, il crée un champ magnétique. Cela permet de stocker de l'énergie magnétique, mais contrairement à une inductance solénoïdale, elle est plate plutôt que d'être enroulée autour d'un noyau. Les inductances en serpentín sont souvent utilisées dans les appareils électroniques pour économiser de l'espace. La figure 1.8 présente une topologie d'inductance de type méandre [f2].



Figure 1.1 8: Inductance méandre intégrée avec deux niveaux de matériau magnétique

5.3 Inductance planaire spiral

L'inductance planaire spirale est un type d'inductance planaire qui se caractérise par une forme spiralée plane que l'on peut intégrer dans les circuits électroniques. Ces inductances sont couramment utilisées dans les applications à haute fréquence en raison de leur conception compacte et de leurs performances efficaces. La structure en spirale permet d'obtenir un niveau d'inductance plus élevé dans un encombrement réduit, ce qui les rend idéales pour divers dispositifs électroniques où l'espace est limité et où un fonctionnement à haute fréquence est nécessaire. La conception et l'optimisation des inductances spirales planaires jouent un rôle crucial dans le développement des systèmes électroniques modernes, en particulier dans des domaines tels que les circuits Radio Fréquence (RF) et les convertisseurs de puissance [5].

Les bobines planaires, également appelées "bobines spiralées" ou "bobines planaires spirales planaires", sont largement utilisées dans les applications de cartes de circuits imprimés (PCB) où la géométrie de la bobine peut être intégrée dans la conception de la carte.

Les inductances sur puce sont généralement conçues comme des bobines planaires, leurs propriétés caractéristiques sont:

- Flux de fuite magnétique élevé

- Capacité parasite fortement dépendante du matériau du substrat
- Il est difficile d'ajouter un noyau magnétique efficace
- Géométrie plane, adaptée aux processus de fabrication compatibles avec la fabrication de circuits intégrés.

La figure 1.9 montre une photographie de la réalisation d'une bobine spirale prise à l'aide d'un microscope électronique:

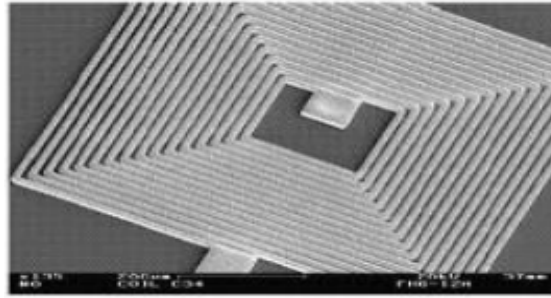


Figure 1.1 9: Exemple d'inductance spirale de forme carrée

Pour ce type de structure, il existe plusieurs modèles topologiques. La figure 1.10 représentent différentes topologies spirales planaires : carrées, circulaires, hexagonale et polygonales.

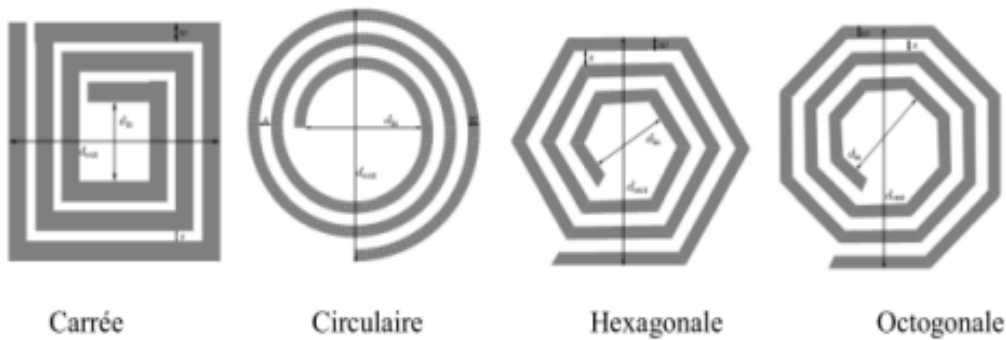


Figure 1.1 10: Différentes topologies spirales planaires

La figure 1.11 illustre un exemple de bobine rectangulaire à trois tours et ses paramètres géométriques :

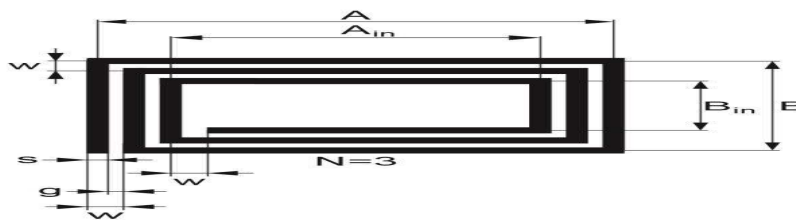


Figure 1.1 11: Forme rectangulaire

5.4 Bobine toroïdale

La bobine toroïdale est souvent utilisée pour les composants discrets à forte inductance. La propriété la plus caractéristique est le très faible flux de fuite magnétique. En voici quelques propriétés caractéristiques :

- Flux de fuite magnétique très faible
- Possibilité d'ajouter un noyau ferromagnétique pour augmenter l'inductance
- Concentration du flux magnétique à l'intérieur du noyau



Figure 1.1 12: Bobine toroïdale

5. Les bobines miniaturisées

5.1. Intérêt technologique de la miniaturisation

Il existe plusieurs géométries possibles de bobines miniaturisées (fig. 1.13). Dans la pratique, ces différentes géométries de bobines sont utilisées pour différentes applications [Beu03, page 67].

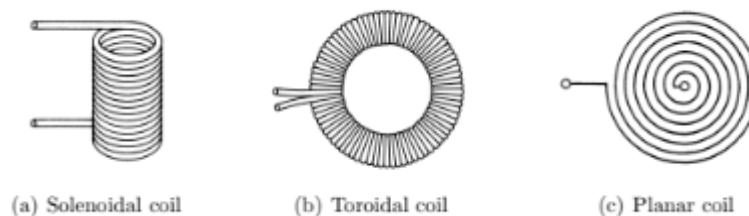


Figure 1.1 13: Diverses géométries de bobines.

Lors de la miniaturisation, la technologie et les processus de fabrication disponibles affectent et limitent la variabilité géométrique. La technologie de fabrication dans les microtechniques est principalement basée sur des étapes de fabrication "planaires". Pour la création de structures tridimensionnelles, davantage d'étapes technologiques sont nécessaires

que pour la fabrication de structures bidimensionnelles. Comme les coûts augmentent directement avec le nombre d'étapes technologiques, les structures planaires sont préférées.

5.2. Miniaturisation de bobine solénoïdale:

La miniaturisation des bobines solénoïdales est un enjeu important pour les applications médicales et de capteurs, car elle permet de réduire la taille des instruments et des systèmes tout en maintenant des performances élevées [16][17][18][19][20]. Les principaux défis techniques sont:

- Utilisation de fils ultrafins (à partir de 0,010 mm de diamètre) pour le bobinage, permettant une grande densité de spires dans un espace réduit.
- Traitement et assemblage précis des bobinages sur des noyaux magnétiques miniatures.
- Gestion efficace de la dissipation de chaleur pour éviter la surchauffe.
- Stabilisation de la perméabilité magnétique du noyau aux hautes fréquences, par exemple en utilisant des structures avec entrefer localisé ou un noyau laminé en spirale.

Des innovations dans la technologie de fabrication, comme l'électrodéposition, permettent de produire ces micro-bobines solénoïdales de haute qualité. Cela ouvre de nouvelles possibilités de miniaturisation pour les instruments médicaux et les systèmes de capteurs.

La figure 1.14 montre la géométrie de la bobine solénoïdale miniatrisée.

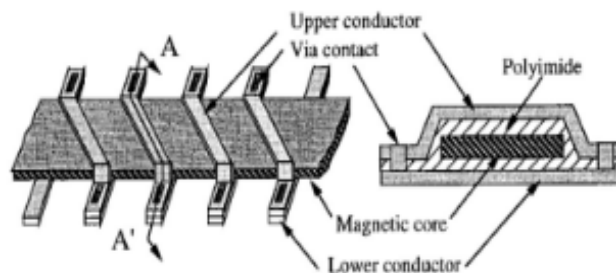


Figure 1.1 14: Bobine solénoïde miniaturisée.

La taille géométrique de la bobine illustrée à la figure 1.14 est de $4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 120 \text{ }\mu\text{m}$. Selon la mesure, une valeur d'inductance de $0,729 \text{ }\mu\text{H}$ a été obtenue avec un facteur de qualité d'environ 1,5 (à 1 MHz). En raison du noyau hautement perméable, la valeur d'inductance varie en fonction de la fréquence et diminue de manière significative à des fréquences supérieures à 1 MHz.

5.3. Miniaturisation de bobine toroïdale

Les bobines toroïdales sont largement utilisées dans les alimentations à découpage, les selfs, les transformateurs et de nombreuses autres applications électroniques. Pour miniaturiser ces bobines, les principaux éléments à prendre en compte sont :

- Matériaux ferrites : L'utilisation de matériaux ferrites permet de réduire la taille du noyau magnétique tout en maintenant de bonnes performances [21][22][23].

- Techniques de fabrication : Des techniques de dépôt en couches minces comme le "sputtering" permettent de fabriquer des micro-bobines toriques intégrées sur silicium avec des dimensions très réduites .

- Conception du bobinage : La forme toroïdale du bobinage permet de minimiser les fuites magnétiques et les interférences électromagnétiques, favorisant ainsi la miniaturisation .

- Choix des paramètres géométriques : Des études ont montré que la variation de la largeur du conducteur, de l'espacement des spires et de la longueur de la spirale impactent les performances et la taille finale de la bobine.

En résumé, la miniaturisation des bobines toriques passe par l'utilisation de matériaux ferrites, de techniques de fabrication avancées et une conception optimisée des paramètres géométriques du bobinage. La figure 1.15 montre une inductance toroïdale miniaturisée. La valeur de l'inductance obtenue était de 2,5 nH en dessous de 10 GHz. Le facteur de qualité maximal Q est de 22 à 1,5 GHz. Remarquons que la fréquence d'utilisation est bien plus élevée que celle de la bobine solénoïdale.

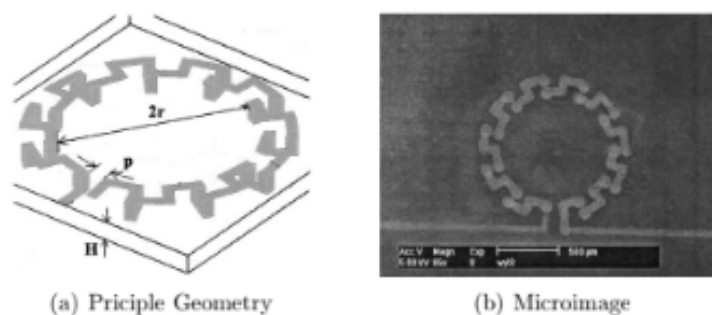


Figure 1.1 15: Bobine toroïdale miniaturisée

La géométrie standard pour les bobines miniaturisées est la bobine spirale plane (fig1.6, fig. 1. 9.c). Nous développerons la fabrication et les principales caractéristiques de ce type de bobines miniaturisée dans les chapitres suivants puisqu'elles font l'objet de notre sujet de recherche.

6. Les effets électromagnétiques dans les conducteurs

6.1. Effet de peau

L'effet de peau ou l'effet pelliculaire est un phénomène électromagnétique, qui a tendance à localiser la densité de courant dans les couches périphériques du conducteur et cela de manière de plus en plus marquée au fur et à mesure que la fréquence augmente. Par conséquent, plus la fréquence augmente, plus la section « réelle » du conducteur est faible,

donc la résistance du conducteur croit en fonction de la fréquence (Mugala, 2005; Weens, 2006).

Pour illustrer ce phénomène la figure 1.16 représente les résultats de la simulation numérique de la distribution de la densité de courant dans un conducteur cylindrique à différentes valeurs de fréquence [12] :

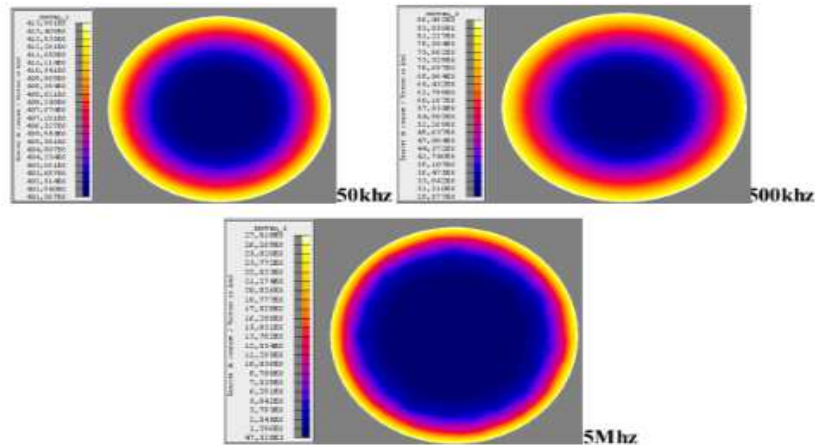


Figure 1.16 Effet de peau : densité du courant J (A/m²) à différentes fréquences.

La densité de courant décroît dans le conducteur avec l'augmentation de la fréquence :

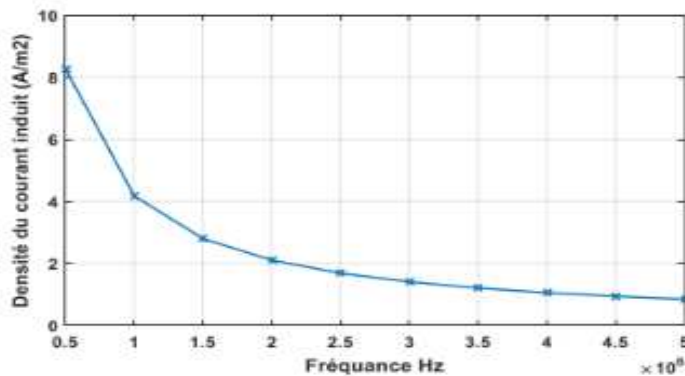


Figure 1.17: La densité du courant en fonction de la fréquence.

La localisation de la densité de courant dans les couches périphériques du conducteur est significative, elle est de plus en plus marquée au fur et à mesure que la fréquence augmente.

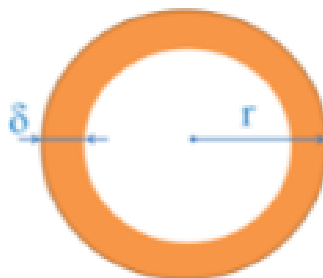


Figure 1.1 18: L'épaisseur de peau dans un conducteur cylindrique.

L'épaisseur de peau δ est définie par:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad (\text{eq. N}^\circ 6)$$

μ : la perméabilité magnétique du matériau

σ : la conductivité électrique

f : la fréquence d'excitation de la source

La densité de courant J est reliée à la section S du conducteur par la relation suivante:

$$J = \frac{I}{S} \quad (\text{eq. N}^\circ 7)$$

J : la densité du courant de la source (A/m^2)

I : le courant de source

Pour une fréquence donnée, la densité de courant décroît dans le conducteur de façon exponentielle suivant le rayon, et ceci à cause de l'effet de peau. Donc la surface effective parcourue par ce flux de courant, pour un conducteur cylindrique est donc :

$$s = \pi(r^2 - (r - \delta)^2) \quad (\text{eq. N}^\circ 8)$$

6.2. Effet de proximité

La circulation d'un courant dans un conducteur génère un champ magnétique de fuite pouvant perturber les conducteurs à proximité de ce premier [13] [14]. Il est totalement dépendant de la géométrie de l'ensemble: section des conducteurs (circulaire, carrée, rectangle...), distance entre conducteurs, asymétrie des conducteurs etc...

On englobe, sous l'expression d'effet de proximité, trois phénomènes voisins qu'il nous paraît nécessaire de dissocier pour plus de clarté malgré leurs similitudes (Figure I.15).

- Effet de proximité direct : Influence mutuelle sur les densités de courant respectives dans des conducteurs rapprochés, parcourus par des courants de même sens.
- Effet de proximité inverse : Influence mutuelle sur les densités de courant respectives, dans des conducteurs rapprochés, parcourus par des courants de sens inverse.
- Effet de proximité induit

7.2.1. Effet de proximité direct

L'effet de proximité direct est un concept qui se réfère à des conducteurs rapprochés, la figure 1.19, illustre cet effet (Ducluzaux, 1977):



Figure 1.1 19:Exemple de l'effet de proximité direct

Il y a trois états d'un conducteur massif [3] :

- a- l'état initial, la densité de courant se concentre sur la périphérie par effet de peau ;
- b- le conducteur est coupé en deux par une fine zone isolante : la répartition du courant ne change pratiquement pas ;
- c- les deux parties de conducteur sont éloignées, la répartition du champ magnétique se modifie alors, la densité de courant se concentre alors aussi sur les faces opposées.

La figure 1.20 représente les résultats de la simulation numérique de la distribution de la densité de courant dans deux conducteurs cylindriques traversés par deux courants identiques dans le même sens [15].

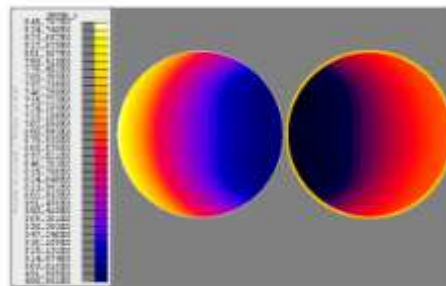


Figure 1.1 20:Exemple de l'effet de proximité direct, densité du courant J (A/m²)

7.2.2 Effet de proximité inverse:

Par dualité au premier cas, c'est l'influence mutuelle sur les densités de courant respectives dans des conducteurs rapprochés, parcourus par des courants de sens inverse. Un exemple de phénomène de proximité inverse est présenté sur la figure 1.21. Dans ce cas, la densité de courant sur les faces en regard augmente contrairement au cas précédent où les conducteurs sont alimentés dans le même sens.

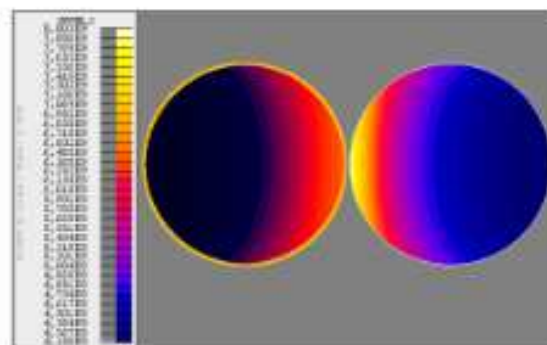


Figure 1.1 21:Exemple de l'effet de proximité inverse, densité du courant J (A/m²)

La figure 1.22 montre les effets de proximités entre deux conducteurs planaires [13] :

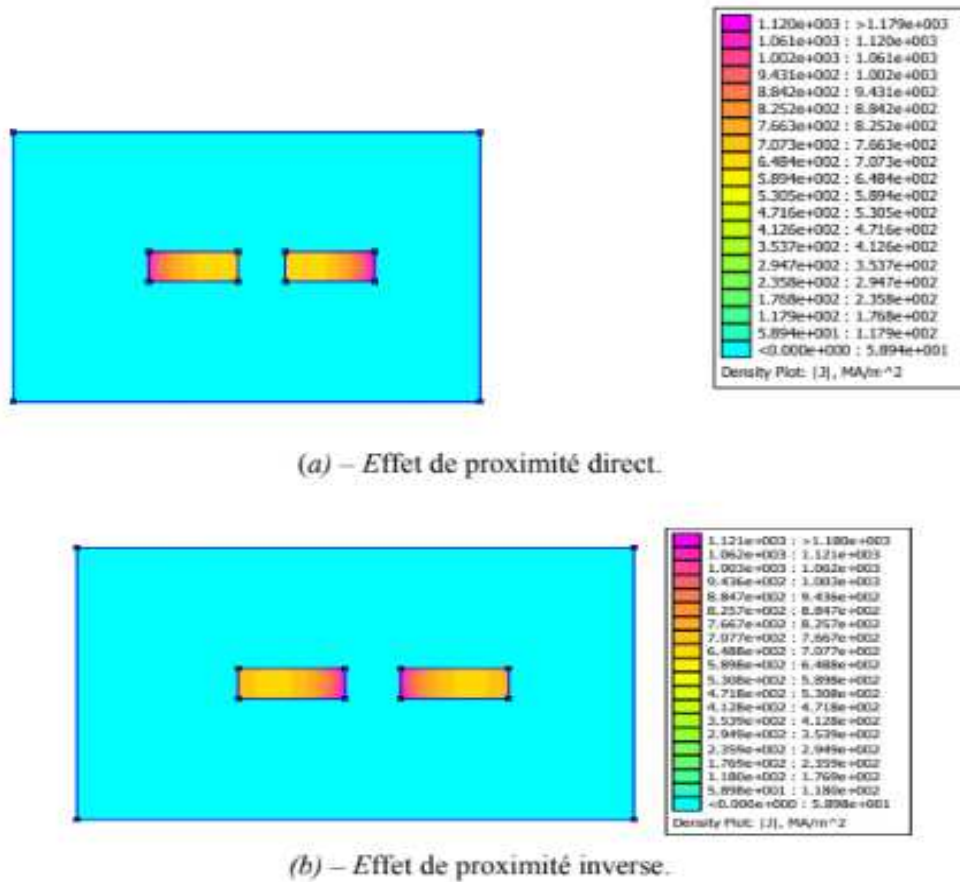


Figure 1.1 22: Effet de proximité entre conducteurs coplanaires.

7.2.3. Effet de proximité induit :

C'est un phénomène de couplage mutuel qui apparaît lorsque des conducteurs situés à proximité et parcourus par un courant alternatif. Afin d'illustrer ce phénomène nous présentons sur la figure 1.23 le résultat d'une simulation numérique [12] qui met en évidence cet effet :

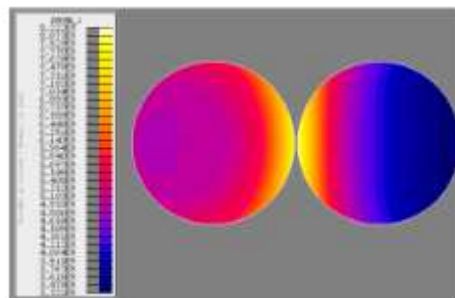


Figure 1.1 23: Exemple de l'effet de proximité induit, densité du courant J (A/m²).

Sur cette figure, l'effet de peau dans le conducteur 1 (à gauche) où le courant est imposé. Dans l'autre conducteur 2 (à droite), il existe une densité du courant induite ayant une direction opposée dans la partie proche du conducteur 1 empêchant le champ créé par ce dernier de pénétrer. Le courant dans le conducteur 2 se referme alors dans sa partie droite.

Conclusion

Les composants passifs offre un aperçu approfondi des éléments clés de ce domaine essentiel de l'électronique. Nous avons exploré la nature des composants passifs, en nous concentrant particulièrement sur la résistance et le rôle crucial de la bobine dans les circuits. En examinant les différentes constructions et types de bobines, de la simple à la miniaturisée, nous avons saisi la diversité des applications possibles et les défis associés à leur conception et fabrication. De plus, en étudiant les effets électromagnétiques dans les conducteurs, tels que l'effet de peau et l'effet de proximité, nous avons pris conscience des implications pratiques de ces phénomènes sur les performances des composants. Dans l'ensemble, ce chapitre nous a permis d'acquérir une compréhension approfondie des composants passifs et de leur importance dans la conception et le fonctionnement des systèmes électroniques modernes.

Dans le prochain chapitre, nous allons nous concentrer sur les bobines planaires, qui sont au cœur de notre intérêt.



Chapitre 2

E

Etat de l'art sur l'intégration des bobines planaire

Chapitre 2

Etat de l'art sur l'intégration des bobines planaires

1. Introduction

Aujourd'hui, les avancées technologiques ont permis des progrès significatifs dans la miniaturisation des composants électroniques, avec des améliorations notables dans le domaine de l'électronique de puissance. Toutefois, un défi majeur demeure dans la miniaturisation des composants passifs tels que les inductances, les condensateurs et les résistances. Ces composants sont essentiels au bon fonctionnement des circuits électroniques, et leur réduction en taille tout en maintenant des performances optimales constitue encore un verrou technologique à surmonter.

Pour cette raison, la recherche en microélectronique se concentre de plus en plus sur l'intégration des composants passifs directement au sein des puces, plutôt que de les laisser positionnés à l'extérieur des circuits intégrés. Cette intégration est cruciale pour optimiser l'espace, réduire les effets parasites, et améliorer la performance des dispositifs électroniques.

Dans ce contexte, les inductances planaires jouent un rôle clé. Contrairement aux inductances traditionnelles, qui sont fabriquées en enroulant un fil conducteur, les inductances planaires sont conçues à partir de couches minces de matériaux conducteurs déposées sur un substrat plat. Cette approche permet non seulement de réduire considérablement l'encombrement, mais aussi d'améliorer l'intégration avec d'autres composants sur le circuit imprimé, tout en offrant des performances accrues pour des applications hautes fréquences.

Cette étude se concentre spécifiquement sur les inductances planaires, en utilisant des lois géométriques pour calculer leur inductance. L'analyse s'appuie sur des équations qui prennent en compte les dimensions et la forme de la bobine pour déterminer ses caractéristiques inductives. En outre, une méthode visuelle sera employée pour extraire les paramètres géométriques des inductances, afin de les intégrer dans une loi spécifique, connue sous le nom de loi de Mohan. Cette approche permet de combiner des techniques analytiques et visuelles pour améliorer la précision des calculs et l'intégration des inductances dans des circuits miniaturisés.

Ainsi, l'intégration des inductances planaires et l'application de méthodes géométriques avancées pour leur calcul représentent des étapes cruciales pour le développement de dispositifs électroniques plus compacts et performants. La recherche continue dans ce domaine vise à affiner ces techniques et à surmonter les défis associés à la miniaturisation des composants passifs.

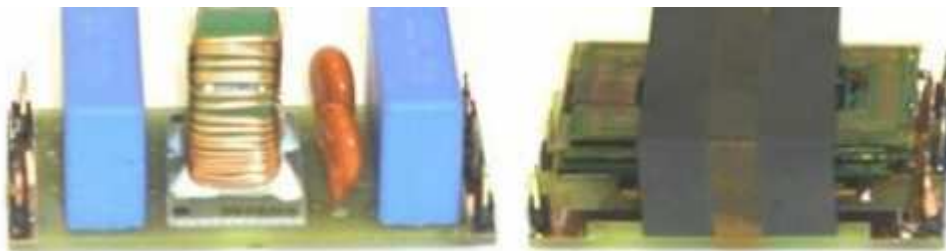
2. Aspects contextuels et l'importance des inductances planaires

Les aspects contextuels de l'intégration sont :

- **Intégration dans les circuits intégrés (CI) :** Avec l'avancement de la miniaturisation des circuits électroniques, les inductances planaires offrent une solution pratique pour intégrer des inductances dans les CI sans compromettre l'efficacité de l'espace ou la performance.
- **Applications haute fréquence :** Les inductances planaires sont particulièrement utiles dans les applications haute fréquence, telles que les communications sans fil, les radars, les systèmes de positionnement global (GPS), etc. Elles offrent une impédance plus stable sur une large gamme de fréquences par rapport aux inductances traditionnelles.
- **Réduction des pertes :** En raison de leur structure plate et de leur configuration en couches minces, les inductances planaires peuvent réduire les pertes dues à l'effet de peau et à l'effet de proximité, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications haute fréquence où les pertes doivent être minimisées.
- **Compatibilité avec les technologies de fabrication existantes :** Les inductances planaires peuvent être fabriquées à l'aide de techniques de micro fabrication bien établies, telles que la lithographie, la gravure chimique, le dépôt de couches minces, etc. Leur fabrication est donc relativement simple et peut être intégrée dans les flux de fabrication existants pour les CI.
- **Flexibilité de conception :** En modifiant la géométrie des couches conductrices, les inductances planaires offrent une flexibilité de conception pour répondre aux besoins spécifiques des applications, telles que la résistance, l'inductance, la fréquence de fonctionnement, etc.

3. L'intégration des composants passifs

L'intégration des composants passifs fait référence à la manière dont les composants tels que les résistances, les condensateurs et les inductances sont intégrés dans les circuits électroniques. Ces composants sont essentiels pour contrôler le flux du courant électrique et le stockage de l'énergie dans les circuits [1].



Composants discrets

Composant passif intégré

Figure II. 1: Intégration des composants passifs [A].

3.1. Les méthodes d'intégration des composants passifs :

L'intégration des composants passifs dans les circuits électroniques est essentielle pour optimiser la taille, la performance et la fiabilité des dispositifs. Voici un aperçu détaillé des principales méthodes d'intégration des composants passifs, chacune ayant ses propres avantages et applications spécifiques :

3.1.1. Montage en Surface (SMT) :

Le montage en surface, ou Surface-Mount Technology (SMT), est la méthode la plus répandue pour intégrer les composants passifs dans les circuits imprimés. Dans cette méthode, les composants sont montés directement sur la surface du circuit imprimé (PCB) sans avoir besoin de percer des trous.

Avantages :

- **Haute Densité de Montage :** Permet de placer un grand nombre de composants sur un espace réduit, augmentant ainsi la densité du circuit.
- **Réduction de Taille :** Contribue à la miniaturisation des circuits électroniques, facilitant la création de dispositifs compacts.
- **Automatisation :** Prend en charge des processus de montage automatisés, ce qui améliore l'efficacité de la production.

Inconvénients :

- **Complexité de Soudure :** Les petits composants SMT peuvent être difficiles à souder manuellement.
- **Densité Thermique :** Peut entraîner des problèmes de dissipation thermique dans des circuits très denses.

3.1.2 Montage en Trou Traversant (THT) :

Le montage en trou traversant, ou Through-Hole Technology (THT), consiste à percer des trous dans le PCB, à insérer les pattes des composants passifs à travers ces trous, et à les souder sur la face opposée du circuit imprimé.

Avantages :

- **Robustesse et Fiabilité :** Fournit une connexion mécanique et électrique robuste, souvent utilisée dans des applications exigeantes.
- **Facilité de Réparation :** Les composants THT sont plus faciles à remplacer ou à réparer manuellement.

Inconvénients :

- **Taille Plus Importante :** Occupent plus d'espace sur le PCB, ce qui peut limiter la densité du circuit.
- **Processus de Fabrication Plus Long :** Le processus de perçage et de soudure est plus long et peut augmenter les coûts de production.

3.1.3. Intégration dans le Substrat :

L'intégration dans le substrat implique l'incorporation directe de composants passifs dans le substrat du PCB lui-même. Cette méthode peut inclure la fabrication de composants passifs comme des inductances et des condensateurs directement dans les couches du substrat lors du processus de fabrication du circuit imprimé.

Avantages :

- **Intégration Optimale :** Permet une intégration très étroite et une réduction des effets parasites en minimisant les connexions externes.
- **Réduction de l'Espace :** Contribue à une miniaturisation encore plus poussée des dispositifs électroniques.

Inconvénients :

- **Complexité de Fabrication :** La fabrication des PCB avec intégration de composants passifs peut être plus complexe et coûteuse.
- **Flexibilité Limitée :** Les modifications après fabrication peuvent être difficiles.

3.2 Les avantages de l'intégration des composants passifs :

L'intégration des composants passifs offre des avantages majeurs en termes de miniaturisation, amélioration des performances et augmentation de la fiabilité, ce qui est crucial pour les systèmes électroniques modernes. Les avantages que l'on peut retirer de l'intégration des composants sont nombreux à savoir par exemple:

3.2.1 Miniaturisation :

- **Réduction de l'Encombrement :** L'intégration des composants passifs permet de réduire considérablement la taille des systèmes électroniques. Par exemple, les micro-bobines et les condensateurs à haute densité peuvent être intégrés sur des substrats silicium, réduisant ainsi l'espace occupé par les composants passifs.
- **Technologies de Gravure et Dépôts :** Les technologies de gravure du silicium et les dépôts épais d'isolants et de métaux permettent de réaliser des composants

passifs à haute densité, ce qui est crucial pour les applications de puissance fonctionnant autour du watt.

3.2.2 Amélioration des Performances :

- **Fiabilité et Robustesse :** L'intégration des composants passifs réduit les boucles d'interconnexions et le volume des composants, ce qui améliore la fiabilité et la robustesse des systèmes.
- **Technologies de Couches Minces :** Les technologies de couches minces, comme l'IPD (Integrated Passive Devices), permettent de réaliser des composants passifs à haute densité, ce qui améliore les performances des systèmes tout en réduisant leur taille.

3.2.3 Augmentation de l'Autonomie Énergétique :

- **Stockage Tampon :** L'intégration de supercondensateurs sur silicium permet de stocker de l'énergie récupérée de manière efficace, ce qui est crucial pour les microsystèmes autonomes.
- **Énergie Ambiante :** Les microsystèmes de récupération de l'énergie ambiante (solaire, thermique, mécanique, acoustique) nécessitent des supercondensateurs pour stocker l'énergie récupérée, ce qui est facilité par l'intégration de ces composants sur silicium.

3.2.4 Applications Diversifiées :

- **Éclairage à LED, Santé et Aérospatial :** Les composants passifs intégrés sur silicium sont utilisés dans des applications variées, telles que l'éclairage à LED, la santé et l'aérospatial, où la miniaturisation est cruciale.
- **Technologies SiP (System in Package) :** L'approche SiP permet de placer tous les composants passifs dans la même puce, facilitant ainsi la miniaturisation et l'amélioration des performances des systèmes.

3.3 Les limites de l'intégration :

L'intégration des composants passifs présente plusieurs limites, notamment :

- **Taille et densité de composants :** Plusieurs composants passifs comme les résistances, les condensateurs et les inductances ont des dimensions physiques qui limitent leur miniaturisation. L'intégration à grande échelle peut être limitée par ces contraintes de taille.
- **Interférences électromagnétiques (EMI) :** Lorsque les composants passifs sont intégrés étroitement, cela peut entraîner des interférences électromagnétiques entre eux, ce qui peut perturber le fonctionnement normal du circuit.

- **Chaleur et dissipation thermique** : L'intégration de composants passifs peut entraîner une densité de puissance plus élevée, ce qui peut augmenter les problèmes de dissipation thermique. Cela peut nécessiter des solutions de refroidissement supplémentaires pour éviter la surchauffe des composants.
- **Fiabilité et durabilité** : Les composants intégrés peuvent être plus susceptibles aux dommages mécaniques et environnementaux, ce qui peut réduire leur fiabilité et durabilité par rapport à des composants discrets.
- **Difficulté de test et de dépannage** : Il peut être plus difficile de tester et de diagnostiquer des problèmes dans des circuits intégrés avec des composants passifs, car ils sont souvent encapsulés et difficilement accessibles pour des mesures directes.
- **Coût de fabrication** : La fabrication de circuits intégrés avec des composants passifs intégrés peut être plus coûteuse que l'utilisation de composants discrets en raison de la complexité supplémentaire du processus de fabrication.
- **Flexibilité et personnalisation** : L'intégration de composants passifs dans un circuit intégré peut limiter la flexibilité et la possibilité de personnaliser le circuit pour des applications spécifiques, car les composants intégrés sont souvent plus difficiles à modifier ou à remplacer que des composants discrets.

4. Les techniques de l'intégration

Deux techniques d'intégration peuvent être envisagées en fonction des niveaux de puissances nécessaires, soit l'intégration hybride ou l'intégration monolithique.

4.1 Intégration hybride :

L'intégration hybride est une approche qui combine différentes technologies de fabrication pour créer des circuits intégrés comportant à la fois des composants actifs (tels que des transistors) et des composants passifs (résistances, condensateurs, inductances) sur un même substrat ou dans un même package.

Ce mode d'intégration est adapté aux applications fonctionnant dans des gammes de courants supérieurs à 30 A et des tensions comprises entre 600V et 1200V. Dans ces gammes de courants et de tensions, il est avant tout nécessaire de recourir à un mode d'intégration conduisant à une bonne évacuation de la chaleur. Les avantages principaux de ce mode d'intégration sont : la réduction des dimensions et la réduction du coût [Na-1][Be-3].

Un exemple d'intégration hybride de tâches en figure II.2 :

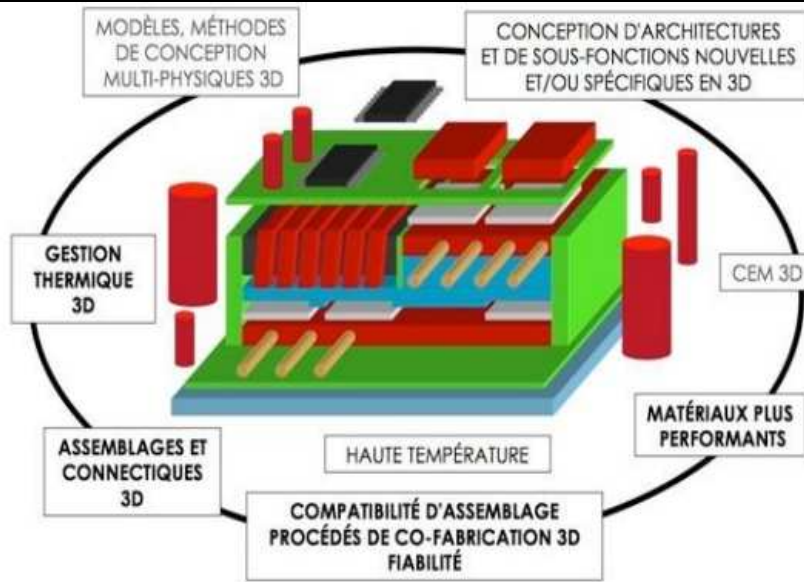


Figure II. 2: Intégration hybride des systèmes de l'électronique de puissance [A].

4.2 Intégration monolithique :

L'intégration monolithique est un processus de conception et de fabrication de circuits électroniques qui implique la réalisation de tous les composants actifs et passifs sur un même substrat, généralement en silicium. Ce type de conception permet de créer des circuits complexes avec une grande densité de composants, ce qui améliore la performance, la miniaturisation et la fiabilité des systèmes électroniques.

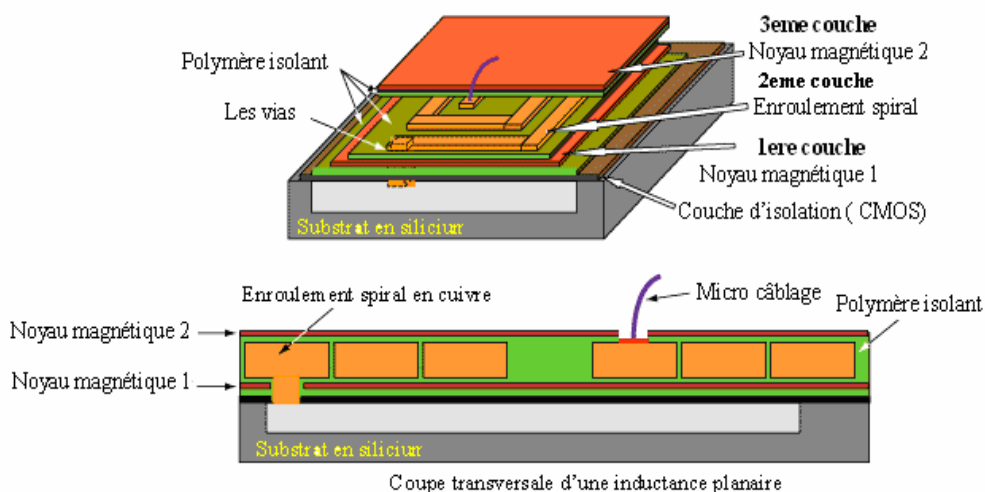


Figure II. 3: Intégration monolithique .

5. Méthodes mathématique pour le calcul de l'inductance

Dans la littérature, il existe plusieurs expressions analytiques qui permettent le calcul de l'inductance, nous en citerons les plus utilisées :

5.1. Méthode de Wheeler :

La méthode de Wheeler est une approche bien établie pour calculer l'inductance des bobines, en particulier celles de forme cylindrique. Voici les principales formules associées à cette méthode :

1. Inductance pour une bobine monocouche

Pour une inductance d'une bobine à air à une seule couche, la formule de Wheeler est donnée par :

$$L(\mu H) = \frac{r^2 \cdot n^2}{9 \cdot r + 10 \cdot l} \quad (1)$$

Où :

L est l'inductance en microhenrys (μH),

r est le rayon de la bobine en pouces,

n est le nombre de tours,

l est la longueur de la bobine en pouces.

2. Inductance pour une bobine multicouche :

Pour une bobine multicouche, la formule est :

$$L = \frac{10\pi N^2 R_1^2}{6R_1 + 9l + 10(R_2 - R_1)} \quad (2)$$

où :

L est l'inductance en henrys(H)

N est le nombre total de spires

R_1 est le rayon du mandrin(en mètres)

$R_2 - R_1$ est l'épaisseur du bobinage (en mètres)

5.2. Méthode de Mohan :

Mohan a développé une expression simple et précise pour calculer l'inductance des formes en spirale à une seule couche, y compris les formes carrées, circulaires, hexagonales et

octogonales (Mohan et al., 1999). Étant donné que cette expression repose directement sur des paramètres géométriques, l'intégration de la vision par ordinateur est appliquée pour automatiser les mesures d'inductance. sachant que nous avons vu cette méthode pendant notre étude.

Formule de Mohan : La formule de Mohan utilisée pour calculer l'inductance est :

$$L = \frac{\mu_0 n^2 d_{avg} C1}{2} (\ln(C2/\rho) + C3\rho + C4\rho^2) \quad (3)$$

Avec :

Le diamètre moyen d_{avg} et le facteur de forme ρ sont généralement définis comme suit :

$$d_{avg} = \frac{d_{out} + d_{in}}{2} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (5)$$

Où d_{in} est le diamètre intérieur, d_{ext} est le diamètre extérieur, μ_0 est la perméabilité du vide, et n est le nombre de tours. Les coefficients de C1 à C4, qui varient en fonction de la géométrie de la bobine, sont listés dans le Tableau 1.

Tableau 1– Coefficients pour le calcul analytique de l'inductance.

Forme	C1	C2	C3	C4
Carée	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	0.2

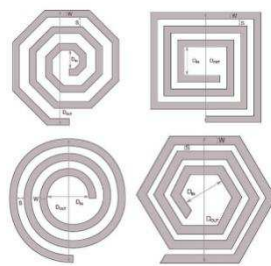


Figure II. 4: Formes de bobines en spirale à une seule couche (carrée, circulaire, hexagonale et octogonale).

6. Les micro-bobines circulaires et leurs applications

Les micro-bobines circulaires trouvent des applications dans divers domaines, notamment :

- **Électronique de Puissance:** Utilisées dans les convertisseurs pour améliorer l'efficacité énergétique.

- **Technologies Médicales:** Employées dans des capteurs et des dispositifs médicaux où la miniaturisation et la précision sont essentielles.
- **Circuits RF:** Utilisées dans les circuits de radiofréquence pour la gestion des signaux.

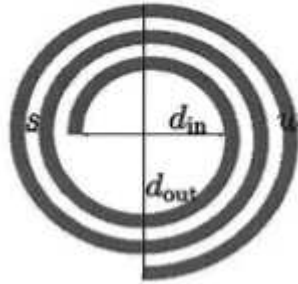


Figure II. 5: Structures inductives planaires spirales Circulaire.

7. Les micro-bobines carrées et leurs applications

Les micros bobines carrées ou rectangulaires sont un type de bobines miniatures utilisées dans diverses applications, notamment dans la technologie médicale et l'industrie des capteurs.

7.1 Fabrication de micro bobines carrées:

La fabrication de micros bobines carrées ou rectangulaires implique plusieurs étapes de conception et de production, visant à créer des composants de haute précision pour des applications électroniques spécifiques. Voici un aperçu du processus de fabrication :

1. Conception et Spécifications :

- **Définition des caractéristiques :** Déterminez les spécifications de la bobine, telles que l'inductance, la résistance, la taille, et la forme. Les caractéristiques souhaitées influencent le choix des matériaux et des techniques de fabrication.
- **Conception de la bobine:** Utilisez des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) pour créer un modèle de la bobine, en tenant compte des dimensions et des caractéristiques électriques.

2. Choix des Matériaux :

- **Fil de bobinage:** Sélectionnez un fil conducteur, généralement en cuivre ou en aluminium, avec un revêtement approprié pour éviter les courts-circuits et améliorer l'isolation.

- **Matériaux de noyau:** Selon l'application, un noyau en ferrite ou en matériau magnétique peut être utilisé pour améliorer les propriétés d'inductance et réduire les pertes.

3. Préparation des Composants :

- **Découpe du fil :** Le fil conducteur est coupé à la longueur nécessaire pour créer les spires de la bobine.
- **Préparation du support :** Pour les bobines carrées ou rectangulaires, un support ou une bobine en forme de cadre est préparé. Ce cadre peut être en plastique ou en matériau isolant.

4. Enroulement de la Bobine :

- **Enroulement automatique :** Les machines d'enroulement automatique sont utilisées pour enrouler le fil autour du support de manière précise. Cette étape est cruciale pour assurer une distribution uniforme des spires et des caractéristiques électriques cohérentes.
- **Contrôle de la tension :** La tension du fil doit être soigneusement contrôlée pour éviter les défauts et les ruptures.

5. Assemblage et Fixation :

- **Fixation des connexions :** Les extrémités du fil sont fixées aux connexions électriques, souvent en soudant ou en utilisant des connecteurs.
- **Encapsulation :** La bobine peut être encapsulée dans une résine ou un boîtier pour la protéger des dommages physiques et des interférences électromagnétiques.

6. Tests et Calibration :

- **Mesure des caractéristiques :** La bobine est testée pour vérifier son inductance, sa résistance et d'autres caractéristiques électriques. Les ajustements peuvent être effectués pour s'assurer que la bobine répond aux spécifications.
- **Inspection visuelle:** Une inspection visuelle est effectuée pour détecter tout défaut physique ou problème de fabrication.

7. Conditionnement :

- **Emballage:** Les bobines finies sont emballées dans des conditions appropriées pour éviter les dommages pendant le transport et le stockage.
- **Documentation :** Les documents nécessaires, tels que les fiches techniques et les certificats de qualité, sont fournis avec les produits.

8. Contrôle Qualité :

- **Tests finaux** : Les bobines sont soumises à des tests finaux pour vérifier leur conformité aux normes de qualité et aux spécifications de conception.
- **Analyse des défauts** : En cas de défaillance, des analyses sont effectuées pour identifier les causes et améliorer le processus de fabrication.

7.2 Applications des micros bobines carrées:

Les micros bobines carrées ou rectangulaires sont utilisées dans divers domaines en raison de leur forme spécifique qui permet une intégration efficace dans des circuits et systèmes électroniques compacts. Voici quelques applications clés :

1. Filtres et Circuits de Fréquence :

- **Filtres RF** : Utilisées dans les filtres radiofréquences pour sélectionner ou rejeter certaines fréquences. Leur forme permet une conception compacte et précise.
- **Filtres d'alimentation** : Dans les circuits d'alimentation pour éliminer les interférences de haute fréquence et stabiliser la tension.

2. Inducteurs pour Circuits Imprimés (PCB) :

- **Composants de circuits imprimés** : Les bobines carrées sont souvent intégrées directement dans les PCB pour des applications telles que les inducteurs d'alimentation ou les circuits de filtrage.
- **Compactibilité** : Leur forme permet une intégration efficace dans des espaces réduits.

3. Transformateurs :

- **Transformateurs de petite taille** : Utilisés dans des transformateurs miniaturisés où l'efficacité et la taille sont cruciales.
- **Adaptation d'impédance** : Dans les circuits pour adapter l'impédance entre différents composants.

4. Équipements de Communication :

- **Émetteurs et récepteurs** : Pour ajuster les caractéristiques de signal ou améliorer la stabilité des fréquences dans les systèmes de communication radio.
- **Antennes intégrées** : Utilisées dans certaines conceptions d'antennes pour améliorer les performances.

5. Technologies Portables :

- **Dispositifs mobiles** : Dans les smartphones, montres intelligentes, et autres appareils portables, où l'espace est limité mais des performances de circuit sont requises.

- **Wearables:** Pour des capteurs et des dispositifs de suivi de la condition physique.

6. Alimentation Électrique :

- **Convertisseurs DC-DC :** Dans les circuits de conversion de tension où la taille et la précision sont importantes pour la performance.
- **Régulateurs de tension :** Pour stabiliser et filtrer les tensions d'alimentation.

7. Capteurs et Détecteurs :

- **Capteurs de position :** Utilisés dans des systèmes de détection de position ou de mouvement grâce à leurs propriétés inductives.
- **Détecteurs de courant:** Dans des applications où la mesure précise du courant est nécessaire.

8. Équipements Audio :

- **Circuits audio :** Pour ajuster les caractéristiques de réponse en fréquence et filtrer les signaux audio dans les équipements audio professionnels.
- **Amplificateurs :** Utilisées dans les circuits d'amplification pour optimiser les performances.

9. Applications Médicales :

- **Dispositifs médicaux :** Dans des équipements tels que les implants ou les capteurs médicaux où des bobines compactes et précises sont nécessaires.

10. Automatisation et Contrôle :

- **Systèmes de contrôle industriel :** Utilisées dans les systèmes de contrôle pour des applications comme le filtrage et l'isolation des signaux.
- **Équipements de test :** Pour la mesure et l'analyse des signaux dans les équipements de test et de diagnostic.

11. Instruments de Mesure :

- **Appareils de mesure :** Pour la conception d'instruments de mesure de haute précision où la forme et la taille des composants sont critiques.

La forme carrée des micros bobines permet une intégration efficace dans des designs compacts et leur configuration peut offrir des avantages particuliers en termes de performance, de miniaturisation et de personnalisation pour divers usages technologiques.

7.3 Avantages des micro bobines carrées

Les micro-bobines carrées présentent plusieurs avantages, notamment :

- Optimisation de l'espace : La forme carrée permet une utilisation efficace de l'espace, facilitant l'intégration dans des circuits compacts et des dispositifs miniaturisés.
- Facilité de fabrication : Les structures carrées sont plus faciles à fabriquer avec des techniques de photolithographie et de dépôt de couches minces, ce qui peut réduire les coûts de production et améliorer la précision.
- Réduction des interférences : Les bobines carrées peuvent avoir des caractéristiques de couplage et de blindage différentes par rapport aux formes circulaires, ce qui peut réduire les interférences électromagnétiques dans certaines applications.
- Meilleure stabilité thermique: En raison de la répartition uniforme du courant à travers les différentes sections de la bobine carrée, ces bobines peuvent offrir une meilleure stabilité thermique par rapport aux autres formes.
- Optimisation de la self-inductance : La géométrie carrée peut offrir une inductance plus prévisible et contrôlable, particulièrement utile dans les circuits de haute précision.
- Facilité d'intégration avec d'autres composants: Les bobines carrées peuvent être plus facilement intégrées dans des circuits imprimés et combinées avec d'autres composants électroniques en raison de leur forme géométrique régulière.
- Réduction des effets de bord : Les coins et les bords bien définis d'une bobine carrée peuvent aider à minimiser certains effets indésirables, comme les variations de champ magnétique qui peuvent être plus prononcées dans les formes arrondies.

8. L'influence du noyau magnétique sur les micro-bobines

L'influence du noyau magnétique sur les micro-bobines est un aspect crucial qui affecte leurs performances et leurs caractéristiques. Voici un aperçu des principaux points concernant cette influence :

8.1 rôle du Noyau Magnétique :

8.1.1 Augmentation du Champ Magnétique:

L'ajout d'un noyau magnétique à une bobine permet d'augmenter le champ magnétique généré par celle-ci. Le noyau magnétique, généralement en matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique, peut multiplier le champ magnétique par un facteur significatif, ce qui améliore l'efficacité de la bobine et donne donc une plus grande inductance.

8.2.2 Perméabilité:

La perméabilité du matériau du noyau est un facteur clé. Les matériaux avec une perméabilité élevée, comme les matériaux amorphes ou nanocristallins, sont souvent utilisés pour maximiser l'amplification du champ magnétique. Cela est particulièrement important dans les applications nécessitant des champs magnétiques puissants.

8.2.3 Pertes Énergétiques:

L'utilisation d'un noyau magnétique peut également entraîner des pertes d'énergie dues à des phénomènes comme l'hystérésis et les courants de Foucault. Ces pertes varient selon la fréquence d'opération et le type de matériau utilisé. Par conséquent, le choix du noyau doit prendre en compte ces facteurs pour minimiser les pertes, surtout dans les applications à haute fréquence.

8.2.4 Saturation Magnétique:

Un autre aspect à considérer est la saturation magnétique du noyau. Si le noyau atteint sa saturation, il ne sera plus capable d'amplifier le champ magnétique, ce qui peut limiter l'efficacité de la bobine. Dans certains cas, des noyaux d'air sont utilisés pour éviter ce problème lorsque des champs très élevés sont présents.

8.2.5 Stabilité Thermique:

La stabilité thermique du matériau du noyau est également cruciale pour garantir un fonctionnement fiable dans diverses conditions environnementales. Les matériaux comme le néodyme sont réputés pour leur excellente stabilité thermique, ce qui les rend adaptés à des applications exigeantes.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté deux types d'intégrations de puissance : l'intégration hybride et l'intégration monolithique. De même, nous avons présenté un état de l'art sur les micro-bobines intégrées, ainsi que les matériaux magnétiques et les différentes méthodes de calcul de la littérature. Ceci, nous a permis de faire le choix du type d'inductances, et des matériaux qui rentrent dans sa réalisation.



Chapitre 3

Les fondements de la vision
par ordinateur de l'intelligence
artificielle et l'algorithme
d'apprentissage

Chapitre 3

Les fondements de la vision par ordinateur de l'intelligence artificielle et l'algorithme d'apprentissage

Introduction :

Dans le cadre de l'évolution rapide des technologies contemporaines, l'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage profond occupent une place centrale dans les progrès récents. Ce chapitre est structuré en deux sections distinctes, chacune visant à explorer des domaines fondamentaux de la technologie.

La première section se concentre sur les bases de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage profond (deep learning) avec ses réseaux de neurones multicouches, qui ont permis des avancées significatives dans des domaines variés, allant des assistants virtuels aux véhicules autonomes. Nous aborderons les principes théoriques sous-jacents, ainsi que les algorithmes et les modèles qui permettent aux machines d'apprendre et de s'améliorer par l'expérience.

La deuxième section, indépendante des concepts d'intelligence artificielle, est consacrée aux techniques de traitement d'images. Nous y explorerons des outils comme OpenCV, ainsi que des méthodes spécifiques de vision par ordinateur appliquées à l'analyse des géométries planaires de PCB (Printed Circuit Boards). Ces technologies permettent aux systèmes de traiter et d'analyser des données visuelles, facilitant ainsi la reconnaissance de formes et la mesure des caractéristiques géométriques.

En clarifiant ces deux approches, ce chapitre offre une vision globale à la fois des principes de l'intelligence artificielle et des techniques avancées de traitement d'images, avec des applications concrètes dans la détermination des géométries planaires des circuits imprimés

1. introduction à l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond :

1.1 Définition de l'apprentissage profond :

L'apprentissage profond est l'une des technologies principales du l'apprentissage automatique. Avec l'apprentissage profond, nous parlons d'algorithmes capables de mimer les actions du cerveau humain grâce à des réseaux de neurones artificielles. Les réseaux sont composés de dizaines voire de centaines de « couches » de neurones, chacune recevant et interprétant les informations de la couche précédente. Les modèles de l'apprentissage profond ont tendance à bien fonctionner avec une grande quantité de

données alors que les modèles d'apprentissage automatique plus classiques cessent de s'améliorer après un point de saturation.

Voici les principales caractéristiques du l'apprentissage approfondi :

- Il s'inspire du fonctionnement du cerveau humain, avec un vaste réseau de neurones interconnectés qui apprennent à partir d'expériences et de données.
- Le réseau de neurones est composé de dizaines voire de centaines de "couches" de neurones, chacune recevant et interprétant les informations de la couche précédente.
- Lors de l'apprentissage, le modèle ajuste automatiquement les poids des neurones pour diminuer l'écart entre les résultats obtenus et les résultats attendus.
- L'apprentissage approfondi est particulièrement performant pour des tâches complexes comme la reconnaissance d'images, la traduction automatique, la conduite autonome, etc.
- Cette technologie connaît un essor important depuis les années 2010, grâce à l'augmentation des données disponibles et des capacités de calcul.

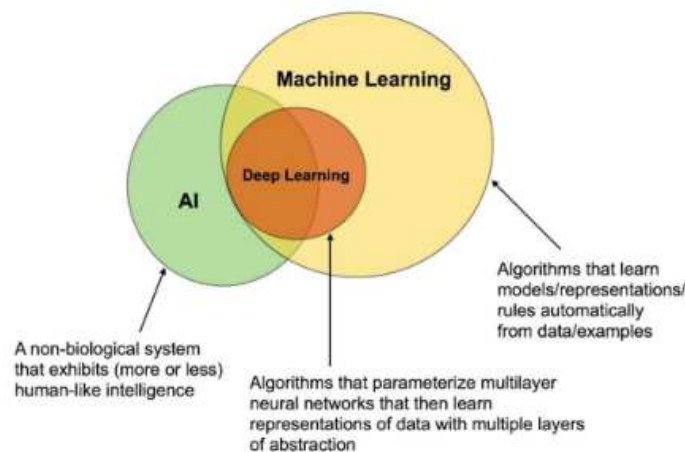


Figure III 3.1 1 : l'apprentissage approfondi

1.2 Définition de l'apprentissage automatique:

L'apprentissage automatique, est une branche de l'intelligence artificielle qui permet aux machines d'apprendre et de s'améliorer de façon autonome à partir de données, sans être explicitement programmées pour cela.

L'apprentissage automatique repose sur l'utilisation de probabilités statistiques et d'algorithmes pour permettre aux ordinateurs d'apprendre par eux-mêmes. Il nécessite de grands volumes de données (big data) pour entraîner les machines et les aider à s'améliorer de manière autonome avec le temps. Il existe deux principales catégories : l'apprentissage supervisé, qui utilise des données étiquetées, et l'apprentissage non supervisé, qui fonctionne sans étiquettes. L'apprentissage automatique est appliqué dans de nombreux

domaines, tels que la reconnaissance vocale, la vision par ordinateur, la détection de fraude et les voitures autonomes, permettant d'automatiser l'analyse prédictive des données et d'accélérer la prise de décision.

1.3 Différence entre l'apprentissage automatique et l'apprentissage approfondi

L'apprentissage automatique et l'apprentissage approfondi sont deux sous-domaines de l'intelligence artificielle (IA) qui diffèrent principalement par les techniques qu'ils utilisent et la complexité des problèmes qu'ils peuvent résoudre.

L'apprentissage approfondi et l'apprentissage automatique se distinguent principalement par leur architecture, leurs besoins en données, leurs domaines d'excellence et leur flexibilité. L'apprentissage approfondi utilise des réseaux de neurones artificiels inspirés du cerveau humain, avec de multiples couches qui apprennent des représentations complexes de manière autonome, nécessitant généralement un volume massif de données d'entraînement. En revanche, l'apprentissage automatique conventionnel emploie divers algorithmes et modèles statistiques comme la régression et la classification, et reste efficace avec des ensembles de données plus limités. L'apprentissage approfondi excelle dans les tâches de perception telles que le traitement du langage naturel, la vision par ordinateur et la reconnaissance vocale, tandis que l'apprentissage automatique est mieux adapté aux données déjà organisées et étiquetées. Bien que l'apprentissage approfondi pousse les performances à de nouveaux niveaux grâce à ses architectures neuronales, l'apprentissage automatique conserve des avantages en termes de flexibilité et d'interprétabilité. En résumé, l'apprentissage approfondi est une forme avancée d'apprentissage automatique, plus performante sur certaines tâches complexes, mais l'apprentissage automatique reste plus flexible et interprétable dans de nombreux cas [28][29]

1.4 La vision par ordinateur :

La vision par ordinateur est un domaine de l'informatique qui se concentre sur l'acquisition, le traitement et l'analyse d'images et de vidéos pour comprendre leur contenu. Cela implique généralement l'utilisation d'algorithmes et de modèles pour interpréter des données visuelles provenant de caméras ou d'autres capteurs.

Les principales applications de la vision par ordinateur incluent la reconnaissance faciale, la détection d'objets, la reconnaissance optique de caractères (OCR), la surveillance vidéo, la réalité augmentée, la cartographie 3D, la robotique et bien plus encore.

Les technologies utilisées dans la vision par ordinateur comprennent le traitement d'images numériques, l'apprentissage automatique (notamment les réseaux de neurones profonds pour la vision artificielle), la géométrie projective, et d'autres techniques mathématiques et statistiques.

Ce domaine est en constante évolution grâce aux progrès rapides dans les technologies matérielles, les algorithmes d'intelligence artificielle et les capacités de traitement des données, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités dans de nombreux secteurs industriels et commerciaux.

1.5 Application et importance dans le contexte de la détection des objets et la classification des images :

La détection d'objets et la classification d'images sont des domaines clés de l'intelligence artificielle et de la vision par ordinateur qui ont de nombreuses applications importantes dans la vie quotidienne permet de localiser et d'identifier les objets présents dans une image ou une vidéo, comme des personnes, des véhicules, des animaux, etc. [32] Cette capacité est essentielle pour des applications telles que :

- La conduite autonome, où la détection en temps réel des piétons, véhicules et obstacles est cruciale pour la sécurité
- La surveillance de sécurité, en permettant de détecter et suivre automatiquement les individus et les objets
- Le commerce de détail, avec des caisses automatiques qui peuvent identifier et comptabiliser les articles sans avoir besoin de les scanner individuellement
- L'analyse de trafic routier, en détectant et comptant les véhicules pour optimiser la circulation [30]

La classification d'images, quant à elle, permet d'identifier la catégorie d'un objet ou d'une scène dans une image, comme un vêtement, un animal ou un paysage. [34] Cela a de nombreuses applications :

- Moteurs de recherche d'images, qui peuvent classer et organiser automatiquement de grandes bases d'images
- Robots et assistants intelligents, qui peuvent identifier et interagir avec les objets de leur environnement
- Diagnostic médical assisté par ordinateur, en classifiant automatiquement des lésions ou anomalies sur des images médicales [33]

Les progrès récents dans les algorithmes d'apprentissage profond, comme les réseaux de neurones convolutionnels (CNN), ont considérablement amélioré les performances de la détection d'objets [31] et de la classification d'images, les rendant essentielles dans de nombreux domaines de la vie moderne. Ces avancées transforment de nombreuses industries et ouvrent la voie à de nouvelles applications innovantes de l'intelligence artificielle.

L'importance de la vision par ordinateur réside dans sa capacité à automatiser des tâches qui étaient auparavant dépendantes de l'interprétation humaine, permettant ainsi des applications plus précises, rapides et efficaces dans une large gamme de secteurs. Les technologies avancées telles que l'apprentissage profond ont considérablement amélioré les performances des systèmes de détection et de classification, ouvrant la voie à de nouvelles innovations et applications potentielles.

2. Les données d'entraînement du model AI :

2.1 La création des données synthétiques

La création de données synthétiques fait référence à la génération de données artificielles qui imitent les caractéristiques des données réelles, mais qui ne sont pas directement extraites de sources existantes. Cette pratique est largement utilisée dans plusieurs domaines pour diverses raisons :

- **Enrichissement des ensembles de données** : Les données synthétiques peuvent être utilisées pour compléter des ensembles de données existants, souvent pour améliorer la précision des modèles d'apprentissage automatique en introduisant une plus grande variété ou en augmentant la taille de l'ensemble de données.
- **Protection de la confidentialité** : Lorsque des données réelles contiennent des informations sensibles sur les individus ou les entreprises, les données synthétiques peuvent être créées pour préserver la confidentialité tout en permettant l'analyse et le partage des données.
- **Tests et simulation** : Les données synthétiques sont utiles pour tester des applications, des algorithmes ou des modèles sans risque d'exposer des données réelles à des scénarios potentiellement destructeurs.
- **Amélioration de la représentativité** : Dans certains cas, les données synthétiques peuvent être plus représentatives ou moins biaisées que les données réelles, permettant ainsi de construire des modèles plus robustes et plus généraux.
- **Réduction des coûts** : La création de données synthétiques peut être moins coûteuse que la collecte de données réelles, surtout lorsque ces dernières sont rares ou difficiles à obtenir.

Les méthodes pour créer des données synthétiques varient en fonction du domaine d'application et des objectifs spécifiques. Elles peuvent inclure des techniques telles que la génération de nombres aléatoires selon des distributions spécifiques, la duplication de patrons observés dans les données réelles, ou l'utilisation de modèles génératifs basés sur l'apprentissage automatique comme les réseaux génératifs antagonistes (GAN).

Cependant, l'utilisation de données synthétiques nécessite une évaluation minutieuse pour s'assurer qu'elles préservent les caractéristiques essentielles des données réelles et ne biaisent pas les résultats d'analyse ou de modélisation.

2.2 Architecture de l'apprentissage profonde

Les modèles d'apprentissage profond sont classés dans un arbre qui comporte trois branches :généralive, discriminative et hybride. Dans chaque modèle, nous montrons quelques exemples demodèles d'apprentissage afin de voir la différence entre les trois modèles.

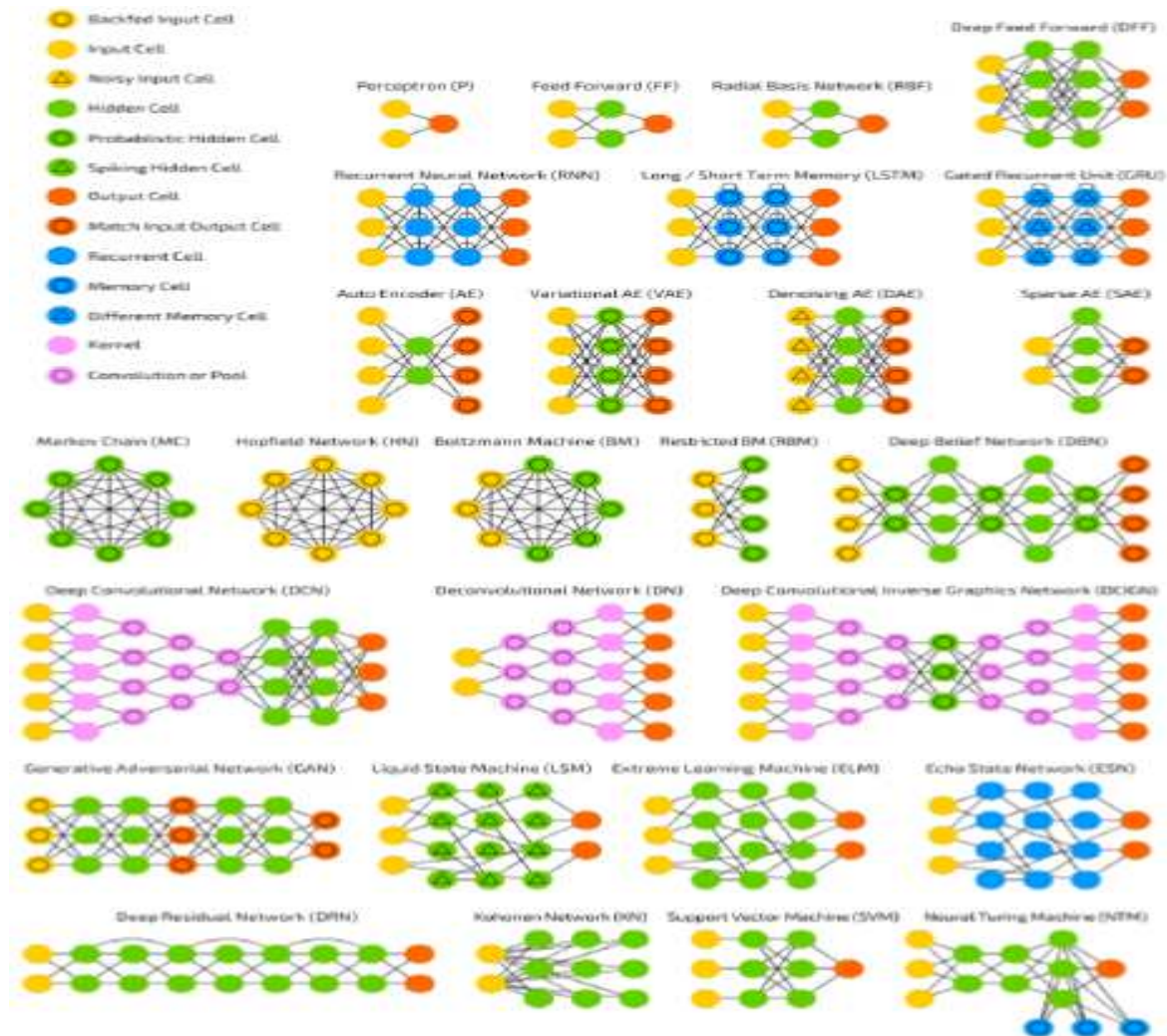


Figure III 3.1 2:les différents architecture d'apprentissage profonde [f4]

2.3 La classification et la régression dans l'IA :

La classification et la régression sont deux des tâches les plus fondamentales en apprentissage automatique. Bien qu'elles soient similaires, il existe des différences clés entre les deux :

Classification :

La classification est une technique d'apprentissage supervisé qui consiste à attribuer une étiquette de classe à une entrée donnée [35]. Le but est d'entraîner un modèle à prédire la classe ou la catégorie à laquelle appartient une donnée, sur la base d'exemples étiquetés [38].

Quelques algorithmes de classification populaires sont :

- La régression logistique, un modèle linéaire pour la classification binaire
- Les arbres de décision, des modèles arborescents qui prennent des décisions basées sur les valeurs des factures
- Les forêts aléatoires, une méthode d'ensemble combinant les prédictions de plusieurs arbres de décision
- Les machines à vecteurs de support (SVM), qui cherchent l'hyperplan optimal séparant les classes

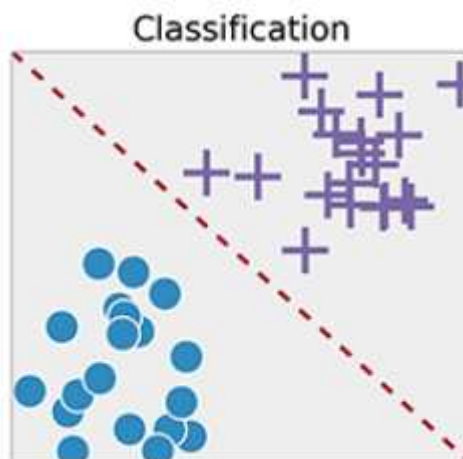


Figure III 3.1 3:classification dans l'AI

Régression

La régression est utilisée pour prédire une valeur numérique en fonction d'une ou plusieurs variables d'entrée. L'algorithme de régression linéaire est l'un des plus connus et utilisés. Il permet de trouver une relation linéaire entre les variables pour faire des prédictions. On distingue la régression linéaire simple (une seule variable) et la régression linéaire multiple (plusieurs variables). L'idée est de trouver les coefficients de la droite de régression qui minimisent l'erreur entre les prédictions et les valeurs réelles [36][37].

En résumé, la classification vise à prédire une catégorie discrète, tandis que la régression prédit une valeur numérique continue. Mais les deux sont des techniques d'apprentissage supervisé essentielles en IA.

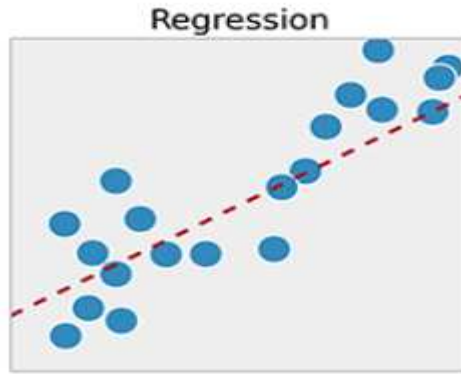


Figure III 3.1 4 : régression dans l'AI

2.4 Réseaux neuronaux convolutifs

La couche de convolution:

C'est la partie du CNN qui effectue les calculs pour obtenir des informations utiles à partir des données de l'image. Chaque couche convolutive est composée de noyaux, qui sont des filtres pouvant être appris. Une image colorée peut être considérée comme une grille tridimensionnelle de pixels. Un filtre, quant à lui, est un réseau bidimensionnel de poids qui est déplacé sur les champs réceptifs de l'image pour voir si une caractéristique est présente ou non. Un filtre est généralement appliqué à une image sous la forme d'une matrice 3x3, mais la taille peut changer. Le produit en points des poids des pixels d'origine et des poids du filtre est alors calculé. Le filtre est ensuite déplacé de n pixels, ce qui est également appelé "stride", et le produit en points des pixels qui sont entrés et des poids du filtre est trouvé. Ce processus, également appelé "convolution", se poursuit jusqu'à la fin de la matrice lue. Le résultat de chaque produit de points est une grille appelée carte d'activation ou carte de caractéristiques. Le filtre a été utilisé pour extraire les informations sur les caractéristiques de l'image et les placer sur la carte des caractéristiques [39]. Les figures 3.23.3 montreront les Représentation par couche convolutive dans les réseaux de neurones convolutifs (CNN).

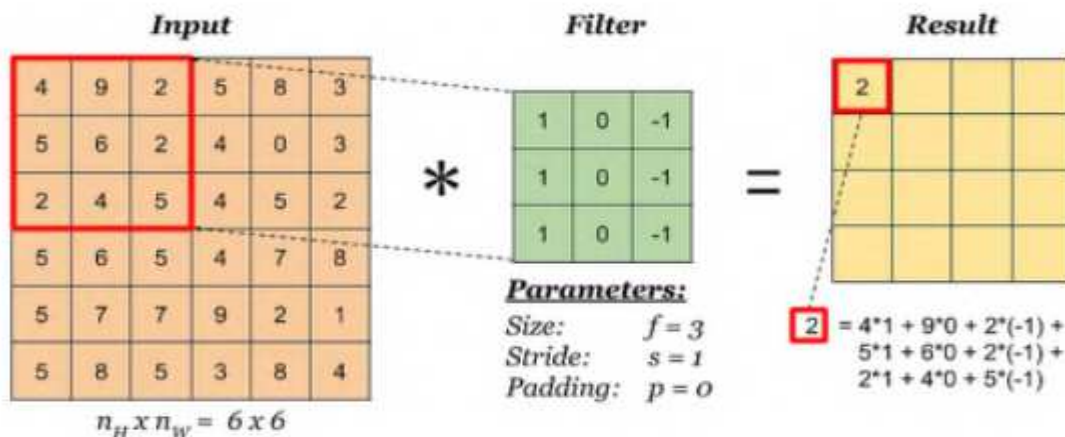


Figure III. 3.4 Représentation par couche convolutive [39]

Comme on peut le voir dans l'image de la figure III.3.4, le noyau ou le filtre a une dimension de 3x3 et un sous-matrice de la même taille que l'image est extrait. Le produit de la matrice est enregistré dans la matrice de sortie. Le filtre avance alors d'un pixel, puisque le pas est de 1 dans l'exemple précédent, et le calcul du produit de points est répété.

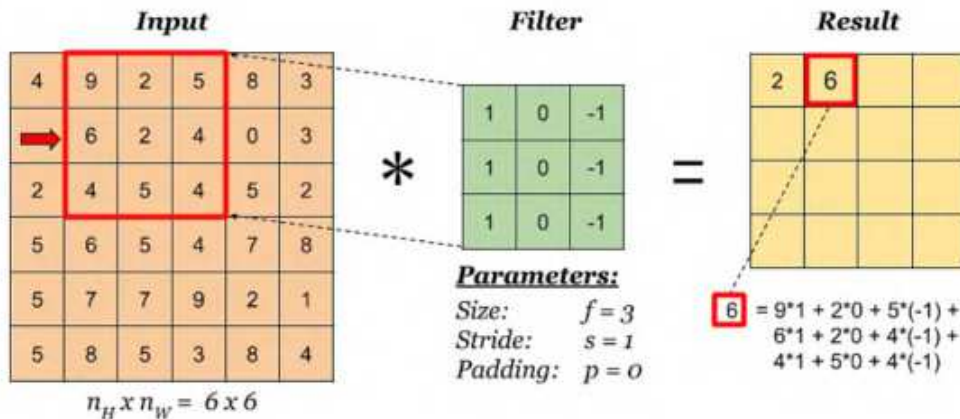


Figure III 3.1 5:B.Représentation par couche convolutive[39]

Il continue à se déplacer autour de la grille de la même manière, créant une carte de caractéristiques. La valeur du pas peut être n'importe quel nombre entier, et un pas plus grand réduit la matrice de sortie. La couche de regroupement est souvent placée entre deux couches de convolution. Elle effectue une opération de regroupement, qui est un processus de sous-échantillonnage. Cela consiste à réduire la taille des images tout en préservant leurs caractéristiques importantes. Pour ce faire, l'image est découpée en cellules régulières de 2×2 pixels qui ne se chevauchent pas, ou en cellules de 3×3 pixels qui sont séparées par un pas de 2 pixels. Ensuite, nous appliquons le processus de regroupement. Les résultats obtenus sont les mêmes que les entrées, mais plus petits. La couche de regroupement réduit le nombre de paramètres et de calculs dans le réseau, ce qui permet d'améliorer les performances du réseau et d'éviter le surapprentissage. Deux types courants de couches de regroupement, comme le montre la figure 3.4, sont le regroupement maximal et le regroupement moyen, où l'on prend respectivement la valeur maximale et la valeur moyenne. Le regroupement maximal est plus souvent utilisé que le regroupement moyen. La couche de regroupement n'a pas de paramètres à apprendre. L'intuition derrière ce que fait le regroupement maximal est que le grand nombre signifie qu'une caractéristique peut être détectée.

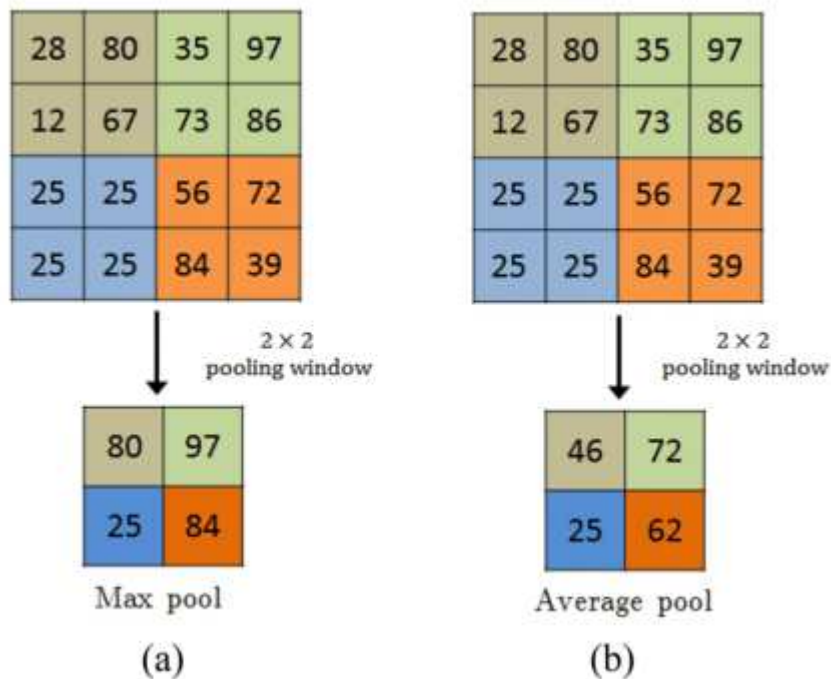


Figure III 3.1 6:Types pool.[42]

La couche entièrement connectée est toujours la dernière couche d'un réseau neuronal, qu'il s'agisse d'un réseau convolutif ou non, et n'est donc pas spécifique aux réseaux de neurones convolutifs. Ce type de couche reçoit un vecteur en entrée et produit un nouveau vecteur en sortie.

2.5 Réseaux neuronaux récurrents (RNN) :

Le Réseau Neuronal Récurrent (RNN) est un type de réseau neuronal où la sortie de l'étape précédente est utilisée comme entrée pour l'étape actuelle. Dans les réseaux neuronaux traditionnels, toutes les entrées et sorties sont indépendantes les unes des autres, mais dans les cas où il est nécessaire de prédire le mot suivant d'une phrase, les mots précédents sont nécessaires, et donc il est nécessaire de se souvenir des mots précédents. C'est ainsi que le RNN est apparu, résolvant ce problème grâce à une couche cachée. La caractéristique principale et la plus importante du RNN est son état caché, qui mémorise certaines informations sur une séquence. Cet état est également appelé état de mémoire car il se souvient de l'entrée précédente du réseau. Il utilise les mêmes paramètres pour chaque entrée, car il effectue la même tâche sur toutes les entrées ou couches cachées pour produire la sortie. Cela réduit la complexité des paramètres, contrairement à d'autres réseaux neuronaux .

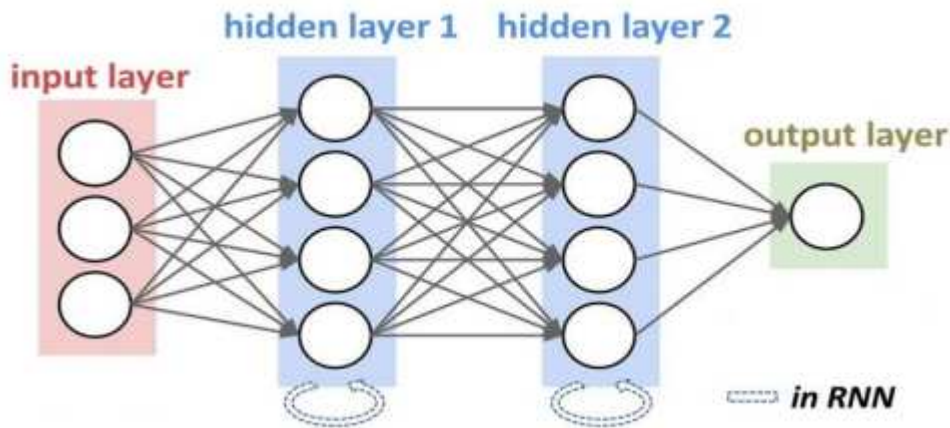


Figure III 3.1 7: Réseaux neuronaux récurrents

2.6 : la détection et la reconnaissance des objets :

2.6.1 Définition :

La détection d'objets est un domaine de vision par ordinateur qui a connu une évolution rapide. Cette technique combine la classification et la localisation d'objets. Un système de détection d'objet peut détecter, localiser et tracer l'objet (déterminer où se trouvent les objets dans une image donnée) et identifie la catégorie de cette dernière (personne, table, chaise, etc.). Il existe différents types d'algorithmes de détection d'objets, certains sont des techniques traditionnelles et d'autres des techniques modernes développées récemment. [43]

2.6.2 Modèles de détection par CNN :

A- R-CNN :

Ross Girshick a proposé le modèle R-CNN de détection d'objets en 2014, qui est composé de trois modules :

- **Génération de propositions régionales** : indépendantes de la catégorie, qui définissent l'ensemble des détections candidates disponibles pour notre détecteur.
- **Extraction de caractéristiques** : le deuxième module est un grand réseau neuronal convolutif qui extrait un vecteur caractéristique de longueur fixe de chaque région.
- **Classification et localisation** : Le troisième module est un ensemble de SVM linéaires spécifiques à chaque classe.

Le modèle R-CNN a obtenu une précision moyenne (mAP) de 53,7% sur la base de données PASCAL VOC 2010. En comparaison, une approche utilisant une pyramide spatiale et une approche par sac de mots visuels a atteint une précision moyenne de 35,1% en utilisant les mêmes propositions de régions. Sur la base de données ILSVRC 2013 composé de 200 classes, la mAP de R-CNN s'élève à 31,4%, ce qui représente une nette amélioration par rapport à OverFeat, qui détenait précédemment le meilleur résultat avec 24,3% [43].

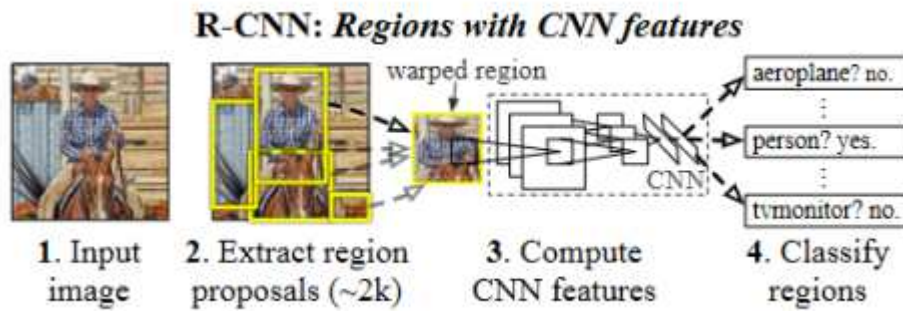


Figure III 3.1 8: Architecture de model R-CNN [43]

B- Fast R-CNN :

Ross Girshick a présenté un nouvel algorithme d'apprentissage qui remédie aux limitations du R-CNN et du SPPNet, tout en améliorant leur vitesse et leur précision. Cette méthode est connue sous le nom de R-CNN rapide (Fast R-CNN) car elle se distingue par sa rapidité d'entraînement et de test en comparaison. Ce réseau prend en entrée une image entière et un ensemble de propositions d'objets. Le réseau traite d'abord l'image entière avec plusieurs couches convolutives (conv) et de mise en commun maximale pour produire une carte de caractéristiques. Ensuite, pour chaque proposition d'objet, une couche de mise en commun des régions d'intérêt (RoI) extrait un vecteur de caractéristiques de longueur fixe à partir de la carte de caractéristiques. Chaque vecteur de caractéristiques est ensuite introduit dans une séquence de couches entièrement connectées (FC) qui se ramifient finalement en deux couches de sortie sœurs. Le Fast R-CNN obtient un résultat de (66.1%) sur le VOC2010 et le meilleur résultat sur le VOC12 avec un a mAP de 65,7 % (et 68,4 % avec des données supplémentaires) [43].

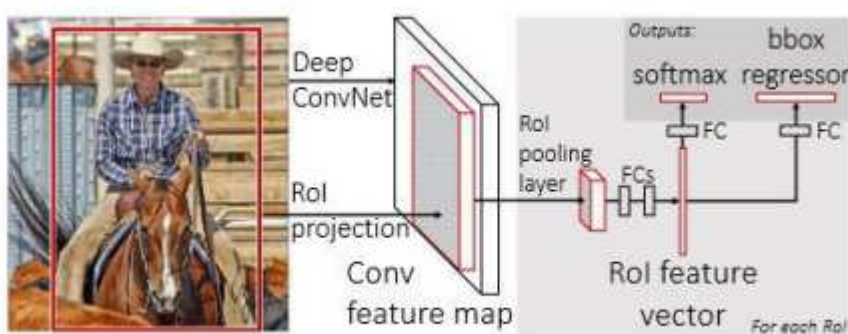


Figure III 3.1 9: Architecture de model Fast R-CNN [43]

D- YOLO : You Only Look Once

YOLO (You Only Look Once) est un modèle de détection d'objets populaire connu pour sa vitesse et sa précision. Il a été introduit par Joseph Redmon et al . You Only Look Once (YOLO) propose l'utilisation d'un réseau neuronal de bout en bout qui effectue des

prédictions à la fois pour les boîtes englobantes (bounding boxes) et les probabilités de classe. Cela diffère de l'approche adoptée par les algorithmes précédents de détection d'objets, qui réutilisaient des classificateurs pour effectuer la détection. Grâce à une approche radicalement différente de la détection d'objets, YOLO a réussi à atteindre des résultats de pointe, surpassant largement les autres algorithmes de détection d'objets en temps réel. Plusieurs nouvelles versions du même modèle ont été proposées depuis la première version de YOLO en 2015, chacune s'appuyant sur son prédécesseur et l'améliorant. Voici une chronologie des développements de YOLO ces dernières années (figure 3.10).[44]

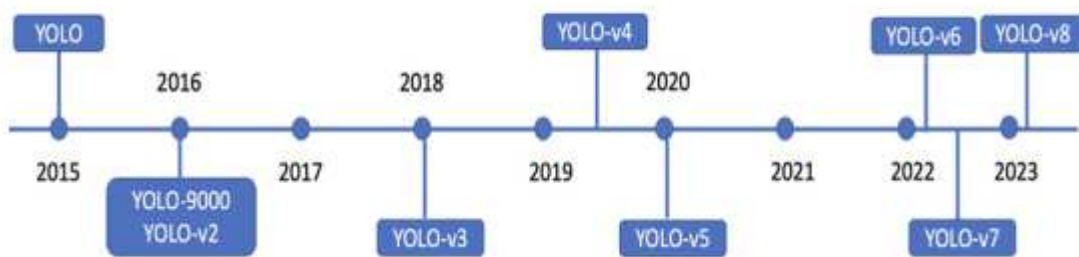


Figure III 3.1 10: Chronologie des versions de YOLO (You Only Look Once) [45]

L’algorithme YOLO prend une image comme entrée, puis utilise un simple réseau de neurones à convolution profonde pour détecter les objets dans l’image. L’architecture du modèle CNN qui forme l’épine dorsale de YOLO est illustrée ci-dessous .

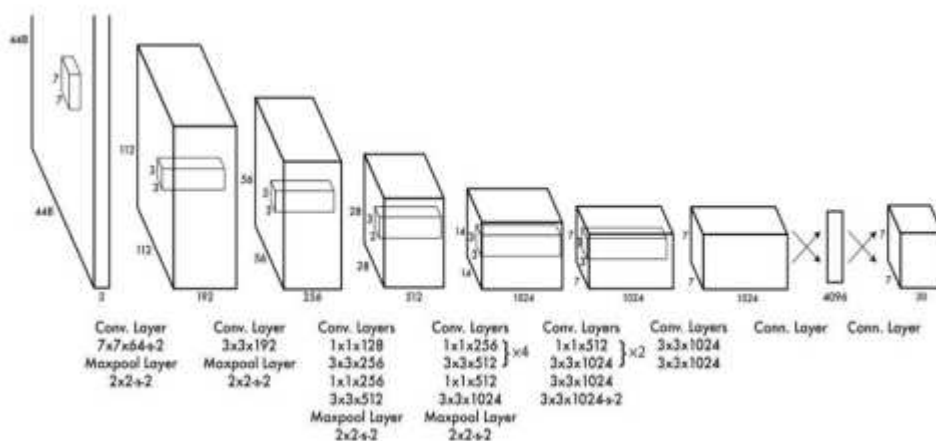


Figure III 3.1 11: Architecture YOLO [44]

Les 20 premières couches de convolution du modèle sont pré-formées à l’aide d’ImageNet en branchant une couche temporaire de mise en commun moyenne et entièrement connectée. Ensuite, ce modèle pré-formé est converti pour effectuer la détection puisque des recherches précédentes ont montré que l’ajout de convolution et de couches connectées à un réseau pré-

formé améliore les performances. La dernière couche entièrement connectée de YOLO prédit à la fois les probabilités de classe et les coordonnées des boîtes limitatives. YOLO divise une image d'entrée en une grille de taille $S \times S$. Si le centre d'un objet tombe dans une cellule de la grille, cette cellule est responsable de la détection de cet objet. Chaque cellule de la grille prédit B boîtes englobantes et des scores de confiance pour ces boîtes. Ces scores de confiance reflètent à quel point le modèle est confiant que la boîte contient un objet et à quel point il est précis dans sa prédiction de la boîte.

YOLO prédit plusieurs boîtes de limitation par cellule de grille. Au moment de la formation, nous voulons qu'un seul prédicteur de boîte limite soit responsable de chaque objet. YOLO attribue un prédicteur pour être « responsable » de prédire un objet basé sur lequel la prédiction a le plus haut courant IoU (en anglais ; Intersection over Union) avec la vérité du terrain (en anglais ; groundtruth). Cela conduit à une spécialisation entre les prédicteurs de boîte limite. Chaque prédicteur est mieux à prédire certaines tailles, rapports d'aspect, ou des classes d'objets, améliorant le score de rappel global [44].

3. Détection d'objets avec YOLO :

YOLO (You Only Look Once) est un algorithme de détection d'objets en temps réel, conçu pour détecter et classifier les objets dans des images ou des vidéos en une seule étape. Voici quelques points clés sur YOLO :

YOLO (You Only Look Once) est un algorithme de détection d'objets qui se distingue par sa rapidité et son efficacité, car il analyse l'image entière en une seule étape, permettant une détection précise des objets en passant le réseau une seule fois. Ce procédé lui confère des performances exceptionnelles, surpassant de nombreux autres algorithmes en termes de vitesse et de précision. Grâce à ses capacités, YOLO trouve des applications variées dans des domaines tels que la conduite autonome, la vidéosurveillance, les soins de santé et la robotique. Sa capacité à fournir des résultats en temps réel le rend particulièrement adapté aux systèmes de surveillance et aux véhicules autonomes. Il peut être entraîné sur des ensembles de données spécifiques et est souvent mis en œuvre avec des frameworks comme Darknet, facilitant son intégration dans divers projets.

4. Avantages et inconvénients de YOLO :

Voici un résumé des principaux avantages et inconvénients du modèle YOLO (You Only Look Once) pour la détection d'objets :

Avantages de YOLO :

Vitesse de traitement élevée :

- YOLO est beaucoup plus rapide que les autres algorithmes de détection d'objets, pouvant atteindre jusqu'à 45 images par seconde.[46]

- Cette vitesse élevée le rend particulièrement adapté aux applications en temps réel comme la conduite autonome ou la vidéosurveillance.

Capacité de détecter de petits objets :

- YOLO a une bonne capacité à détecter des objets de petite taille, même au sein d'une foule
- Cela en fait un outil efficace pour des applications comme la surveillance vidéo ou la recherche de personnes/animaux perdus.

Flexibilité et polyvalence :

- YOLO peut être utilisé dans de nombreux domaines comme la médecine, l'automobile, la sécurité, etc.
- Son architecture légère et sa vitesse en font un choix intéressant pour de nombreuses applications pratiques.

Inconvénients de YOLO :

Précision inférieure à certains algorithmes plus lents :

- Bien que très rapide, YOLO a une précision légèrement inférieure à des algorithmes plus lents comme Faster R-CNN.
- Ce compromis entre vitesse et précision doit être pris en compte selon les besoins de l'application.

Difficultés avec les petits objets et les scènes complexes :

- YOLO a parfois du mal à détecter avec précision les objets de très petite taille ou dans des scènes très encombrées.
- Des variantes plus récentes comme YOLO-NAS ont été développées pour améliorer ces aspects.[48][47]

5. Les outils de traitement d'images :

5.1 OpenCV :

Est une bibliothèque open source pour la vision par ordinateur, l'apprentissage automatique et le traitement d'images. OpenCV prend en charge une grande variété de langages de programmation comme Python, C++, Java, etc. Il peut traiter des images et des vidéos pour identifier des objets, des visages, ou même l'écriture d'un humain. Lorsqu'il est intégré à diverses bibliothèques, comme Numpy qui est une bibliothèque hautement optimisée pour les opérations numériques, alors le nombre d'armes augmente dans votre Arsenal, c'est-à-dire que toutes les opérations que l'on peut faire dans Numpy peuvent être combinées avec OpenCV [49].

5.2 Python :

Python est un langage de programmation interprété, orienté objet, de haut niveau, avec une sémantique dynamique. Sa syntaxe claire et expressive, ainsi que sa conception modulaire et orientée objet, en font un langage idéal pour les applications de script et de développement rapide. De plus, Python utilise la bibliothèque OpenCV pour le traitement des images.

6. caractéristique d'une image numérique :

L'image est un ensemble structuré d'informations, caractérisé par les paramètres suivants :



Figure III 3.1 12: Image numérique

6.1 Pixel :

Le pixel, contraction de l'expression anglaise "pictureelement", représente le point le plus minuscule d'une image. Il constitue une entité mesurable capable de recevoir une structure et une quantification. Alors que le bit représente la plus petite unité d'information traitable par un ordinateur, le pixel constitue le plus petit élément manipulable par les dispositifs matériels et logiciels d'affichage ou d'impression. Par exemple, la lettre A peut être représentée sous forme d'un groupe de pixels (Figure 3.12).

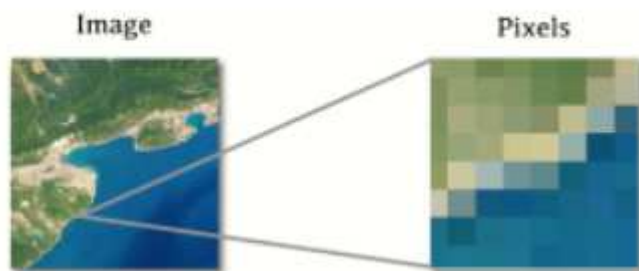


Figure III 3.1 13: Représentation Pixels d'une image [51]

La quantité d'information portée par chaque pixel varie significativement entre les images monochromes et celles en couleur. Dans une image monochrome, chaque pixel est encodé sur un octet, et la mémoire nécessaire pour afficher l'image dépend directement de sa taille.

En revanche, pour une image couleur en mode RVB (rouge, vert, bleu), chaque pixel est représenté par trois octets distincts : un pour chaque composante de couleur (R pour rouge, V pour vert, et B pour bleu).

6.2 Dimension :

La dimension d'une image fait référence à sa taille, représentée sous forme d'une matrice où chaque élément correspond à une valeur numérique représentant l'intensité lumineuse des pixels. Le produit du nombre de lignes et du nombre de colonnes de cette matrice donne le nombre total de pixels présents dans l'image.

6.3 Résolution :

La résolution désigne la qualité ou la précision des détails obtenus par un moniteur ou une imprimante lors de la création d'images. Sur les écrans d'ordinateurs, elle est exprimée en nombre de pixels par unité de mesure (pouce ou centimètre). Le terme résolution est également utilisé pour décrire le nombre total de pixels affichables horizontalement ou verticalement sur un moniteur : plus ce nombre est élevé, meilleure est la résolution.

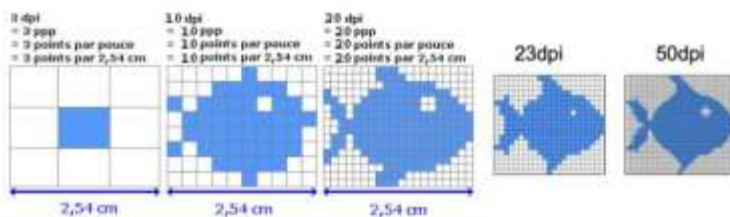


Figure III 3.1 14: résolution d'une image [52]

6.4 Bruit :

Un bruit (parasite) dans une image est considéré comme un phénomène de brusque variation de l'intensité d'un pixel par rapport à ses voisins, il provient de l'éclairage des dispositifs optiques et électroniques du capteur. Visuellement, on distingue en général deux types de bruit d'image qui s'accumulent [53] :

- le bruit de chrominance, qui est la composante colorée des pixels bruités : il est visible sous la forme de tâches de couleurs aléatoires,
- le bruit de luminance, qui est la composante lumineuse des pixels bruités : il est visible sous la forme de tâches plus foncées ou plus claires donnant un aspect granuleux à l'image.



Figure III 3.1 15: image bruitée [54]

6.5 Contours :

Les contours marquent la transition entre les objets dans une image, délimitant la frontière là où les niveaux de gris des pixels montrent une variation notable. Les textures quant à elles définissent la configuration interne des objets. L'extraction de contours implique la détection des endroits dans une image où les textures changent de manière significative.



Figure III 3.1 16: contour d'une image [55]

6.6 Luminance :

La luminance représente le niveau de luminosité des points d'une image, définie comme le rapport entre l'intensité lumineuse d'une surface et son aire apparente pour un observateur distant. En termes courants, on utilise souvent le terme luminance plutôt que brillance pour décrire l'éclat d'un objet. Une bonne luminance se caractérise par plusieurs aspects :

1. Des images lumineuses et brillantes.
2. Un bon contraste : il est crucial d'éviter les extrêmes où le contraste tend vers le blanc ou le noir, car cela peut entraîner une perte de détails dans les zones sombres ou lumineuses.
3. L'absence de parasites ou d'artefacts visuels indésirables.

6.7 contraste :

Le contraste désigne la nette différence entre deux zones distinctes d'une image, spécifiquement entre les parties sombres et les parties claires. Il est mesuré en fonction des niveaux de luminance de ces deux zones de l'image.

Si $L1$ et $L2$ sont les degrés de luminosité respectivement de deux zones voisines $A1$ et $A2$ d'une image, le contraste se définit par le rapport :

$$c = \frac{L1-L2}{L1+L2} \quad (\text{eqN}^01)$$



Figure III 3.1 17:contraste d'une image[56]

6.8 Histogrammes :

Un histogramme est un graphique statistique qui illustre la répartition des intensités lumineuses des pixels dans une image, montrant le nombre de pixels pour chaque niveau d'intensité. C'est un outil crucial pour le contrôle de l'exposition photographique :

- Durant la prise de vue, il permet de régler et d'affiner les paramètres de capture.
- Lors du traitement, il facilite la correction de l'exposition, l'ajustement de la balance des couleurs et d'autres manipulations comme l'amélioration du contraste, la correction des images sous-exposées, l'amplification des composantes chromatiques, ou la correction des irrégularités du capteur.

En interprétant l'histogramme avec soin, on peut révéler les détails et les nuances capturés par le capteur et présents dans le fichier, mais qui ne sont pas nécessairement visibles à l'œil nu.

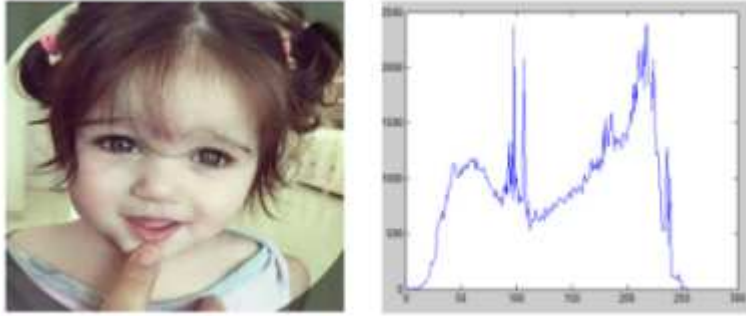


Figure III 3.1 18: image avec histogramme [55]

6.8.1 Histogrammes des images niveaux de gris :

L'histogramme des images en niveaux de gris montre toutes les valeurs des pixels entre le blanc (255) et le noir (0).

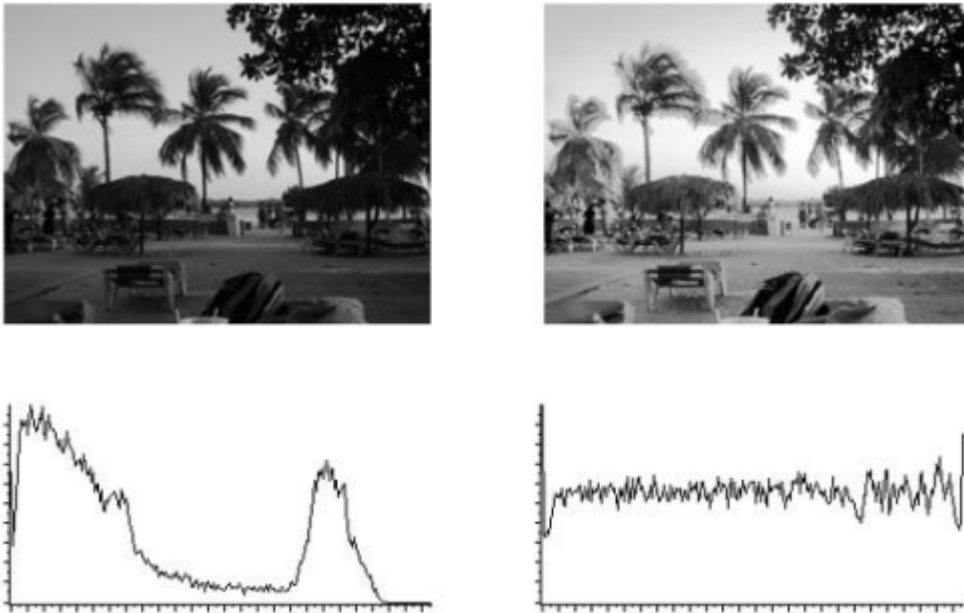


Figure III 3.1 19 : exemple d'histogramme avec différents niveaux de gris

6.8.2 Histogrammes des images couleurs :

Pour une image en couleur, chaque plant (rouge, vert, bleu) a son histogramme comme montre la Figure 3.20.

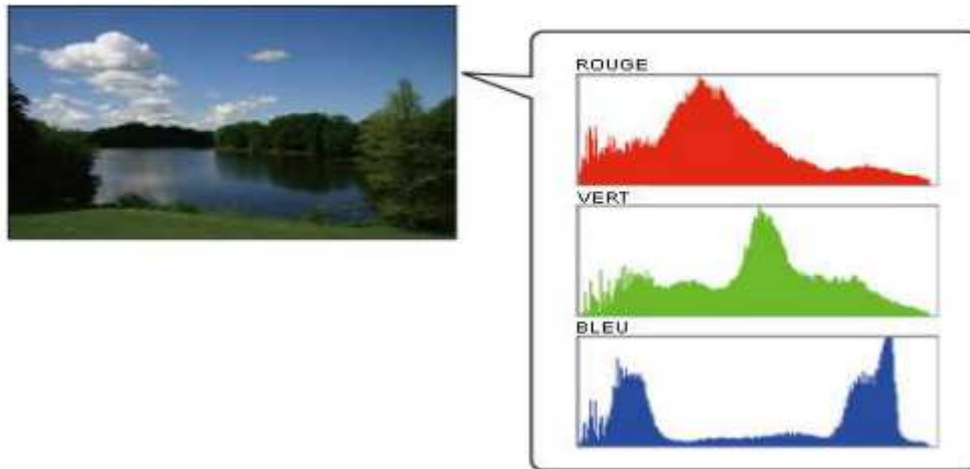


Figure III 3.1 20: Histogrammes des trois plans de l'image en couleur

7. Filtrage :

Le principe du filtrage consiste à modifier les valeurs des pixels d'une image, généralement dans le but d'améliorer son apparence. En réalité, cela implique la création d'une nouvelle image en utilisant les valeurs de pixels de l'image d'origine. Plusieurs filtres sont appliqués, effectuant différents traitements en fonction des besoins de l'analyse. Un exemple de filtrage d'image est l'utilisation d'un filtre pour supprimer le bruit présent dans l'image en éliminant les pixels bruités [57].

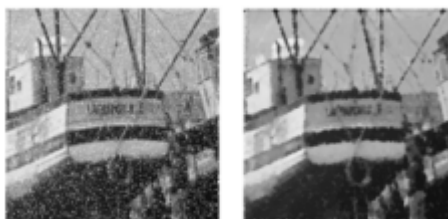


Figure III 3.1 21: Exemple de filtrage d'une image bruitée (à gauche l'image d'origine, à droite l'image filtrée) [57].

7.1. Filtres linéaire

7.1.1. Filtre moyen :

Ce filtre consiste à considérer chaque point de l'image et d'en faire la moyenne avec les huit pixels voisins. Ceci va adoucir l'image en réduisant les fluctuations des niveaux de

gris. Ce type de filtre utilise la moyenne non pondérée des voisins, il est la forme d'un

masque tel que
$$:H = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Ce masque ne changera pas de taille, ce sera toujours une matrice 3x3 (ou 5x5, 7x7.....) qui va se déplacer sur toute l'image. Pour chaque pixel P de l'image, on effectuera la convolution entre le masque et la sous-image de même taille que le masque est centrée sur P, et on remplacera la valeur de P par le résultat obtenu [58].

7.1.2. Filtre gaussien :

Il représente une bonne qualité de résultats ainsi qu'une facilité de mise en œuvre. Il utilise la moyenne pondérée des voisins et peut être mis sous la forme du masque suivant

$$:H = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

7.2. Filtres non linéaire

7.2.1. Filtre médian :

L'idée principale du filtre médian est de remplacer chaque entrée par la valeur médiane de son voisinage.

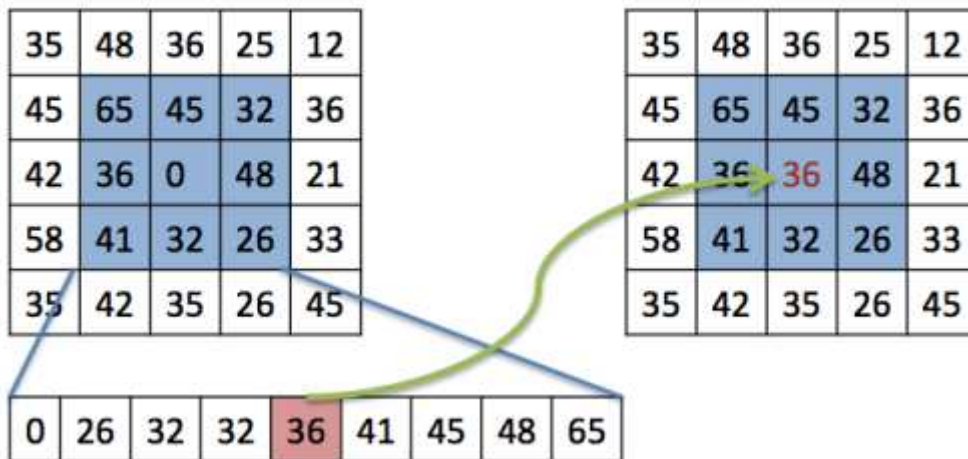


Figure III 3.1 22: fonctionnement du filtre médian

7.2.2. Filtre maximum :

Le filtre maximum est une méthode de filtrage non linéaire utilisée pour éliminer le bruit de type "poivre" dans les images. Il opère selon un principe similaire au filtre médian,

sauf qu'il sélectionne la valeur maximale parmi les pixels voisins au lieu de la valeur médiane. Pour chaque pixel (i, j) :

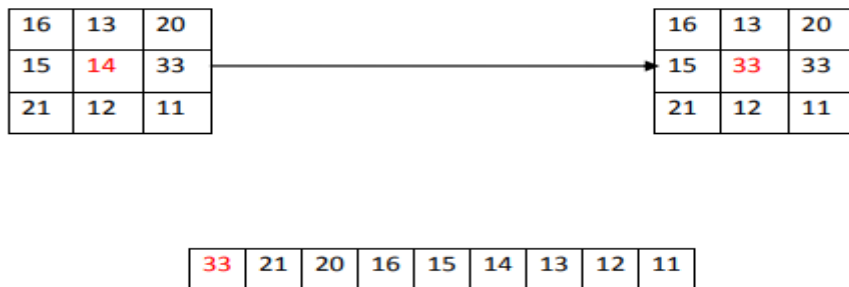


Figure III 3.1 23: fonctionnement du filtre maximum

7.2.3. Filtre minimum :

Ce filtre est employé pour supprimer le bruit de type "sel" dans les images. Il fonctionne sur le même principe que le filtre médian et le filtre maximum, à la différence que cette fois-ci, il utilise la valeur minimale parmi les pixels voisins pour chaque pixel (i, j).

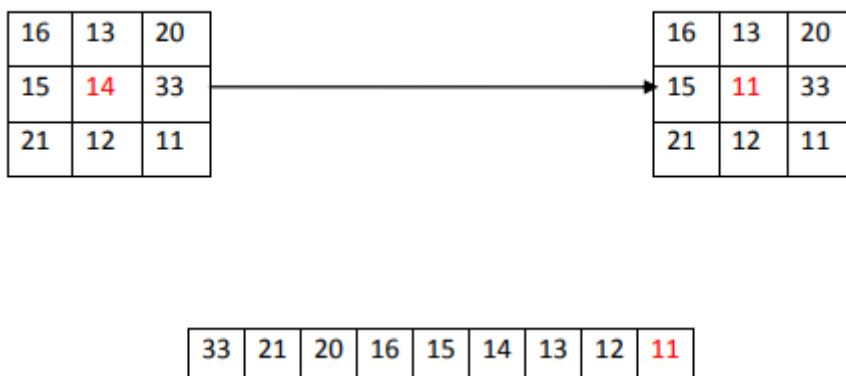


Figure III 3.1 24 : fonctionnement du filtre minimum

7.3. Filtres morphologiques :

Les filtres morphologiques sont fréquemment employés pour éliminer les pixels isolés qui sont perçus comme du bruit dans une image binaire. Ces techniques font appel à un élément structurant pour effectuer différentes opérations morphologiques telles que la dilatation, l'érosion, l'ouverture et la fermeture mathématiques.

7.3.1. La délitation :

Cette opération permet de supprimer les pixels blancs isolés, mais elle a pour effet d'ajouter des pixels noirs autour des objets présents dans l'image. En conséquence, cela conduit à agrandir la taille de ces objets.

7.3.2. L'érosion :

Cette opération permet de supprimer les pixels noirs isolés situés au milieu des parties blanches de l'image. En conséquence, elle entraîne une réduction de la taille des objets présents dans l'image.

7.3.3. L'ouverture :

L'opération d'ouverture consiste à effectuer une érosion suivie d'une dilatation. Son but est de détecter les petites taches noires présentes dans l'image.

7.3.4. La fermeture :

La fermeture est l'opération inverse de l'ouverture, qui consiste à faire subir à l'image une dilatation suivie d'une érosion. Elle permet d'éliminer les blancs qui se trouvent dans l'objet

8. binarisation :

La binarisation, également connue sous le nom de seuillage, est une méthode de traitement d'images qui consiste à diviser les pixels d'une image en deux catégories distinctes selon un seuil unique. Les pixels peuvent ainsi être classés comme appartenant au fond ou à l'objet (scène) principal. Suite à cette division, l'image est transformée en une représentation en deux niveaux : les pixels qui dépassent le seuil sont conservés (souvent représentés par la valeur 1) tandis que ceux qui sont en dessous sont éliminés (représentés par la valeur 0), ou vice-versa, selon le type de seuillage appliqué. Cette technique permet d'isoler l'objet d'intérêt du reste de l'image pour un traitement ultérieur.

9. Exemples d'applications concrètes du traitement d'images :

- Vérification de présence/absence : En fin de chaîne de production, une caméra vidéo est utilisée pour vérifier la présence d'une pièce au sein d'un ensemble plus complexe. Ce contrôle est souvent réalisé en appliquant un seuillage simple dans une région spécifique.

- Évaluation du niveau de maturation des fruits sur une ligne d'emballage : Cette tâche consiste à identifier le degré de maturité des fruits en se basant sur leur couleur et leur texture, déterminant ainsi la catégorie sous laquelle ils seront emballés et commercialisés.

- Construction et correction de cartes géographiques à partir d'images satellites ou aériennes : Des images sont alignées avec des données topographiques pour créer des cartes précises intégrant des éléments tels que les voies de communication, les plans d'eau et les parcelles agricoles.

- Surveillance et évaluation de la production agricole : Cette méthode permet de surveiller le développement des cultures, de calculer les besoins en irrigation, d'estimer le rendement et de prévoir les récoltes à grande échelle.

- Reconnaissance de l'écriture : Les systèmes de reconnaissance de l'écriture manuscrite sont devenus suffisamment avancés pour lire automatiquement la majorité des adresses manuscrites sur le courrier post

Recherche d'images par contenu : Cette technique vise à trouver dans une base de données d'images celles qui sont similaires à une image exemple ou qui possèdent des caractéristiques spécifiques, comme la présence d'un vélo.

- Segmentation et suivi de cellules vivantes en microscopie : Cette méthode permet d'analyser le comportement de groupes de cellules vivantes pour détecter d'éventuelles anomalies.

Alors on a appliqué ces techniques dans le chapitre 4 sur notre bobine plane pour extraire la géométrie et appliquer la loi de Mohan à la fin pour calculer l'inductance.

Conclusion :

En conclusion, au cours de ce chapitre, nous avons exploré en profondeur le fonctionnement des techniques d'intelligence artificielle et des réseaux neuronaux, en mettant en lumière leur rôle central dans l'apprentissage et l'amélioration des systèmes autonomes. De même, nous avons examiné OpenCV, une bibliothèque puissante et polyvalente, qui regroupe une multitude de techniques algorithmiques avancées pour le traitement d'images, telles que la binarisation d'Otsu et la conversion en niveaux de gris.

Ces découvertes nous permettent de mieux comprendre comment ces outils peuvent être combinés et utilisés pour résoudre des problématiques complexes liées à l'analyse visuelle. À travers l'étude de ces techniques, nous avons posé les bases nécessaires à la mise en œuvre pratique de ces concepts dans notre étude.

Dans le chapitre suivant, nous appliquerons ces connaissances à des cas concrets, notamment pour l'analyse des géométries planaires des circuits imprimés (PCB). Cela nous permettra de mettre en pratique les algorithmes et les approches présentés ici, tout en évaluant leur efficacité et leur pertinence dans le cadre de notre recherche.

Chapitre 4

Implémentation et résultats de
l'extraction de la géométrie
planaire des bobines

Chapitre 4

Implémentation et résultats de l'extraction de la géométrie planaire des bobines

Introduction :

Ce chapitre se concentre sur le développement et l'analyse de données synthétiques pour la reconnaissance de formes géométriques, afin de créer un modèle capable de déterminer si la géométrie est circulaire ou carrée et de la détecter à l'aide d'un programme d'apprentissage profond. Nous détaillons les étapes nécessaires pour générer ces données, en mettant en œuvre des techniques d'annotation, en utilisant des plateformes de gestion des données, et en comparant divers modèles de détection de formes géométriques.

Pour illustrer ces processus, nous avons utilisé Visual Studio Code et Python pour créer des images de spirales circulaires et carrées. Ces images ont été annotées avec MakeSense.ai et importées dans Roboflow, où elles ont été divisées en ensembles d'entraînement, de validation et de test, puis enrichies par des techniques d'augmentation telles que le retournement et le recadrage. Deux modèles distincts, un modèle standard de Roboflow et un modèle YOLO NAS Small, ont été entraînés et évalués en termes de précision moyenne (mAP) pour comparer leur performance dans la détection des formes. Après la reconnaissance des formes par ces modèles, nous avons procédé à l'extraction de la géométrie.

Les images traitées avec OpenCV ont permis l'extraction des paramètres géométriques essentiels tels que le diamètre et le nombre de tours des spirales. Ces mesures ont été converties en millimètres à l'aide d'un ratio pixel-millimètre et ont servi à calculer l'inductance. Nous avons validé ces résultats en les comparant aux valeurs théoriques attendues, ce qui démontre l'efficacité des méthodes employées pour améliorer les systèmes de détection et d'analyse automatisés.

Cette démarche est illustrée dans le schéma de flux ci-joint, qui explique notre processus dans la figure.

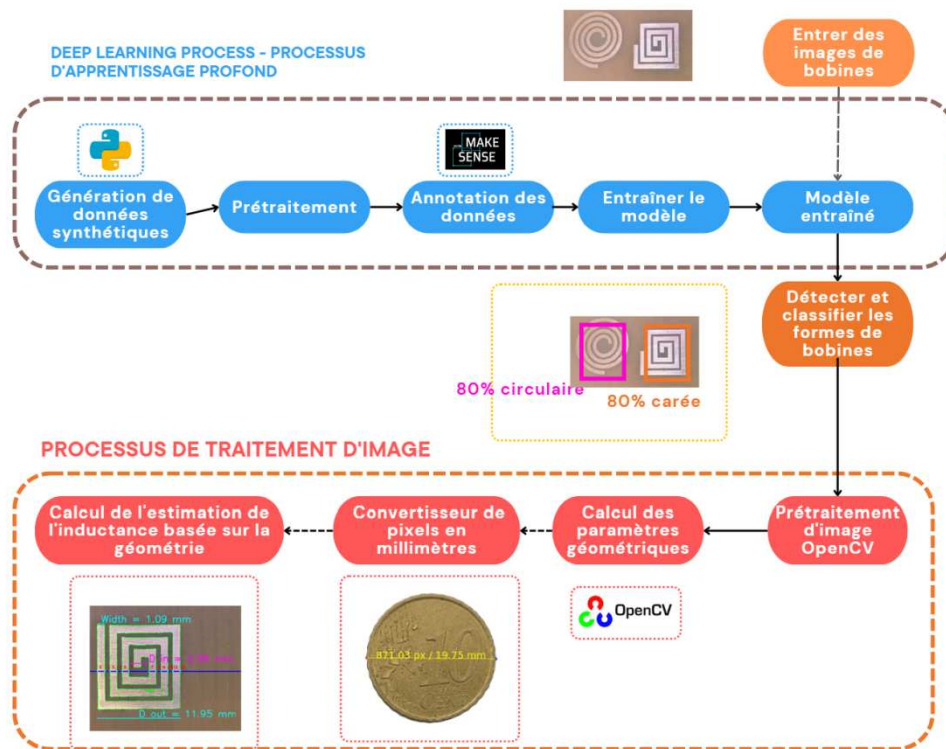


Figure IV 1 : schéma de flux de démarche

1. Environnement de Développement des données synthétiques

1.1. Définition de Visual code :

C'est un éditeur de code extensible développé par Microsoft pour Windows, Linux et macOS. Les fonctionnalités incluent la prise en charge du débogage, la mise en évidence de la syntaxe, la complétion intelligente du code (IntelliSense4.), les snippets, la refactorisation du code et Git intégré. Les utilisateurs peuvent modifier le thème, les raccourcis clavier, les préférences et installer des extensions qui ajoutent des fonctionnalités supplémentaires. Le code source de Visual Studio Code provient du projet logiciel libre et open source VS Code de Microsoft publié sous la licence MIT permissive, mais les binaires compilés constituent un freeware, c'est-à-dire un logiciel gratuit pour toute utilisation mais propriétaire. Dans le sondage auprès des développeurs réalisé par Stack Over flow en 2023, Visual Studio Code a été classé comme l'outil d'environnement de développement (IDE) le plus populaire, avec plus de 73 % des 86 544 répondants déclarant l'utiliser.

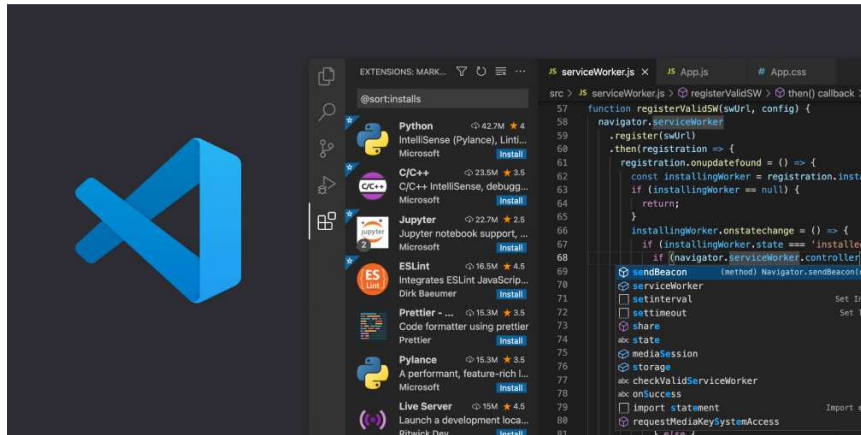


Figure IV 2 : Fenêtre de Visual Studio Code

1.2. Langage de programmation 'python'

C'est un langage de programmation interprété, orienté objet, de haut niveau, avec une sémantique dynamique. Sa syntaxe claire et expressive, ainsi que sa conception modulaire et orientée objet, en font un langage idéal pour les applications de script et de développement rapide.

1.3. Utilisation de la bibliothèque turtle

La bibliothèque Turtle, est une bibliothèque de dessin en Python. Elle est utilisée pour concevoir et dessiner les formes spirales circulaires et carrées. Elle permet de contrôler la tortue graphique pour tracer des formes précises.

2. Création de Données

L'objectif est de créer un jeu de données composé d'images JPEG de deux types de formes géométriques : les spirales circulaires et les spirales carrées. Ces images seront générées à l'aide de Turtle, en utilisant des boucles pour dessiner progressivement les spirales en faisant varier le rayon pour les spirales circulaires et la longueur des côtés pour les spirales carrées. Le jeu de données synthétiques ainsi constitué permettra de simuler des scénarios réels afin d'entraîner un modèle d'intelligence artificielle à reconnaître et différencier ces deux classes de formes. La diversité des images sera assurée par des variations dans le nombre de tours, le diamètre intérieur (*din*) et le diamètre extérieur (*dout*) des spirales. Les images seront sauvegardées au format JPEG, un choix optimal pour la compression et le stockage tout en préservant une qualité adéquate pour l'entraînement du modèle.

2.1 .Formes circulaires

Un script Python a été conçu pour générer 54 images de spirales circulaires, utilisant des fonctions mathématiques pour calculer les coordonnées des points constituant chaque spirale. Les coordonnées x et y sont déterminées par des fonctions trigonométriques (cosinus

et sinus) et linéaires, assurant une haute résolution grâce à un nombre défini de points. Le rayon des spirales augmente linéairement avec le nombre de tours. La diversité des images est garantie par des variations dans le nombre de tours et la largeur des lignes, ajustées selon des plages spécifiées par l'utilisateur. Ces variations sont cruciales pour créer un jeu de données suffisamment diversifié pour l'entraînement du modèle d'intelligence artificielle.



Figure IV 3: les données synthétiques circulaires

2.2. Formes carrée

Un script Python a été utilisé pour générer 67 images de spirales carrées, en calculant les coordonnées des points à l'aide d'algorithmes spécifiques. Les coordonnées x et y sont déterminées par une séquence de mouvements dans les directions droite, haut, gauche, et bas, avec un mouvement initial vers la droite suivi d'un tournant horaire pour former la spirale. La séquence de directions change après un nombre déterminé de pas, augmentant à chaque itération pour créer la spirale. Les images sont tracées et exportées en JPEG à l'aide de la bibliothèque Matplotlib, avec un fond blanc et des lignes noires pour garantir une bonne visibilité. Chaque image est sauvegardée dans un répertoire dédié, avec un nom de fichier indiquant le nombre de tours et la largeur de la ligne. La diversité des spirales est obtenue par des variations dans le nombre de tours et la largeur des lignes, ajustées selon des plages spécifiées par l'utilisateur. Ces variations sont essentielles pour assurer un jeu de données suffisamment diversifié, ce qui est crucial pour l'entraînement du modèle d'intelligence artificielle.

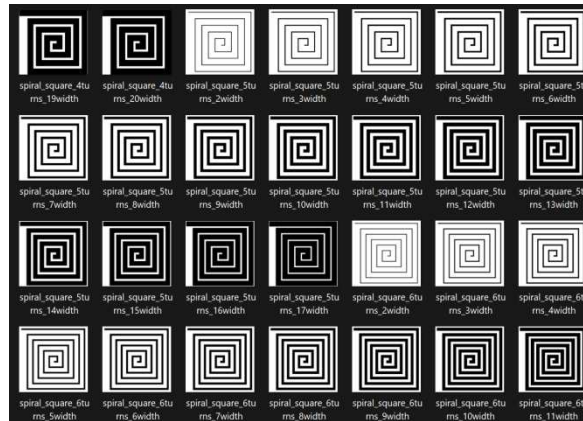


Figure IV 4: les données synthétiques carrée

3 .Annotation des Images

3.1. MakeSense.ai

MakeSense.ai est une plateforme en ligne gratuite et open-source qui facilite l'annotation d'image pour les projets de vision par ordinateur, notamment pour le deeplearning. Elle est très utile pour les tâches telles que la classification d'images, la détection d'objets et la segmentation sémantique. Voici quelques caractéristiques et fonctionnalités de MakeSense.ai : Caractéristiques principales : Accessible en ligne : MakeSense.ai est accessible via un navigateur web, ce qui élimine le besoin d'installer des logiciels spécifiques sur votre ordinateur. Support de plusieurs formats d'annotation : Bounding Boxes : pour la détection d'objets. Polygones : pour la segmentation précise des objets.

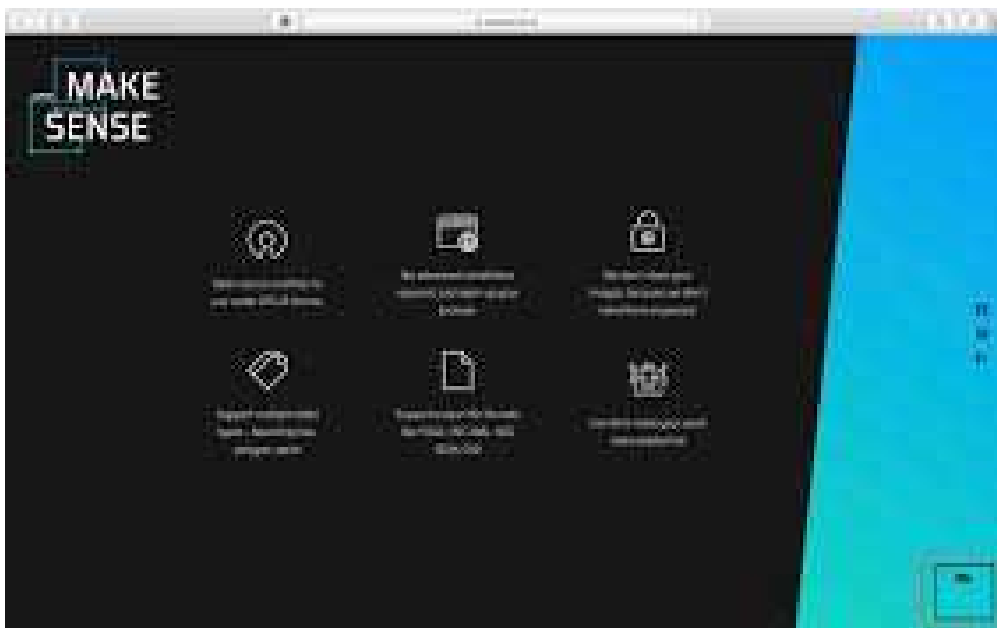


Figure IV 5:fenêtre de makesense.a

3.2. Processus d'annotation

Après la création des images de spirales circulaires et carrées, le processus d'annotation et d'étiquetage a été réalisé à l'aide de Makesense.ai, une plateforme en ligne spécialisée dans l'annotation manuelle. Chaque spirale a été soigneusement étiquetée et annotée pour être classée en quatre catégories distinctes. Ce processus a impliqué une identification précise des formes, permettant ainsi une division correcte en classes spécifiées pour assurer une classification précise dans le jeu de données.

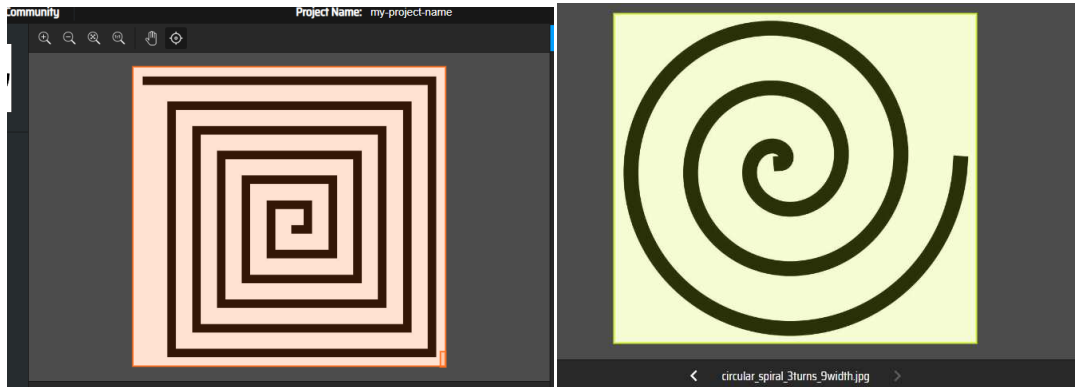


Figure IV 6: les annotation des forme carrée et circulaire

3.3. Format du fichier d'annotation

Le fichier d'annotation généré par Makesense.ai est typiquement structuré en JSON ou XML, et contient des informations détaillées sur les annotations pour chaque image. Chaque annotation inclut un identifiant unique pour chaque image, facilitant ainsi la correspondance avec les images originales. Les objets annotés sont classés en différentes catégories, telles que "circulaire" ou "carrée", selon le type de spirale identifié. Pour chaque objet, le fichier fournit les coordonnées des boîtes englobantes sous forme de valeurs normalisées : x_{min} , y_{min} , x_{max} , et y_{max} , représentant les limites de la boîte qui délimite l'objet dans l'image. De plus, les coordonnées du centre de la boîte englobante sont normalisées (0.498528, 0.502427), et les dimensions de la boîte englobante (0.969292, 0.975728) sont également fournies en valeurs normalisées, ce qui signifie qu'elles sont exprimées en fractions de la taille totale de l'image. Ces détails permettent une compréhension précise de la position et de la taille des objets annotés, tout en identifiant clairement la catégorie de chaque spirale.

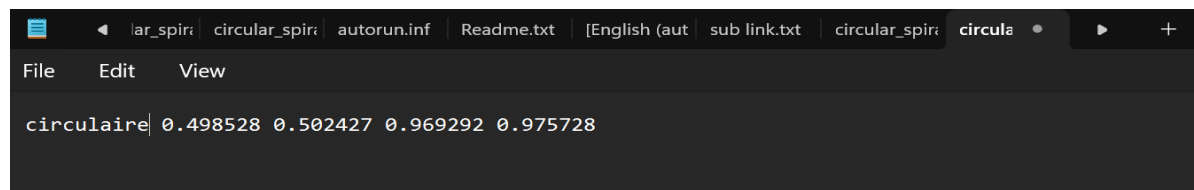


Figure IV 7: Exemple d'un fichier d'annotation

4. Préparation et Augmentation des Données

4.1 Définition de la Plateforme Roboflow

Roboflow est un outil basé sur le cloud qui facilite le développement de modèles de vision par ordinateur en fournissant une suite complète d'outils pour la gestion des données, l'annotation, l'entraînement de modèles, ainsi que leur déploiement. Il permet aux utilisateurs de préparer et de traiter des ensembles de données d'images, d'entraîner des modèles de machine learning et d'exporter ces modèles pour diverses applications.

-Avantages de Roboflow :

Roboflow simplifie les processus complexes de la vision par ordinateur grâce à une interface utilisateur intuitive, rendant l'annotation des données et la configuration des modèles accessibles tant aux débutants qu'aux professionnels. La plateforme propose des outils robustes pour la gestion des données, permettant aux utilisateurs de créer, annoter et transformer facilement des jeux de données, tout en assurant une gestion efficace des versions. Avec un support pour divers formats d'image et modèles d'apprentissage automatique, Roboflow facilite l'intégration avec des frameworks populaires tels que TensorFlow, PyTorch et ONNX. La plateforme automatise également des tâches courantes comme le prétraitement des images et l'optimisation des modèles pour différents environnements d'exécution, qu'il s'agisse d'appareils mobiles ou de serveurs. En outre, Roboflow permet un déploiement simplifié des modèles, accélérant ainsi le passage de la phase de développement à la production. Enfin, la documentation détaillée et le support technique fourni par Roboflow aident les utilisateurs à résoudre les problèmes rapidement et à maîtriser efficacement les fonctionnalités de la plateforme.

-Inconvénients de Roboflow :

Bien que Roboflow offre une version gratuite, certaines fonctionnalités avancées, l'accès à des volumes importants de données et des niveaux de service plus élevés nécessitent un abonnement payant, ce qui peut représenter un coût notable pour certaines organisations. L'utilisation de Roboflow entraîne également une dépendance à ses outils et services, ce qui peut compliquer la transition vers d'autres solutions si les besoins changent. De plus, pour des projets de vision par ordinateur particulièrement complexes ou spécialisés, les fonctionnalités standard de Roboflow peuvent ne pas être suffisantes, nécessitant des ajustements ou développements supplémentaires. Les performances de traitement et d'entraînement peuvent varier en fonction des ressources disponibles et de la taille des ensembles de données, avec des projets de grande envergure nécessitant des ressources computationnelles importantes. Enfin, en tant que plateforme cloud, Roboflow soulève des préoccupations en matière de confidentialité et de sécurité des données, surtout lorsqu'il s'agit de données sensibles ou propriétaires.

On outre, on a utilisé Roboflow pour entraîner notre AI modèle.

4.2 Chargement des Données

Après avoir exporté notre jeu de données annoté depuis Makesense.ai, l'étape suivante consiste à importer ces données dans Roboflow pour les entraîner. Il est donc nécessaire de télécharger les images avec le fichier d'annotations qui contient les rectangles englobant (bounding boxes) de chaque image.

Nous avons téléchargé un total de 54 images de spirales circulaires et 67 images de spirales carrées, accompagnées de leurs fichiers d'annotations respectifs, incluant des rectangles englobants qui définissent précisément les contours des objets à détecter. Après le téléchargement, nous avons minutieusement vérifié l'importation des données pour nous assurer que toutes les images et annotations étaient correctement alignées. Un aperçu des images importées et de leurs annotations a été consulté dans Roboflow, garantissant ainsi que la qualité des données est maintenue. La capture d'écran ci-dessous illustre les images et leurs annotations correctement importées, confirmant que le processus s'est déroulé sans problème.

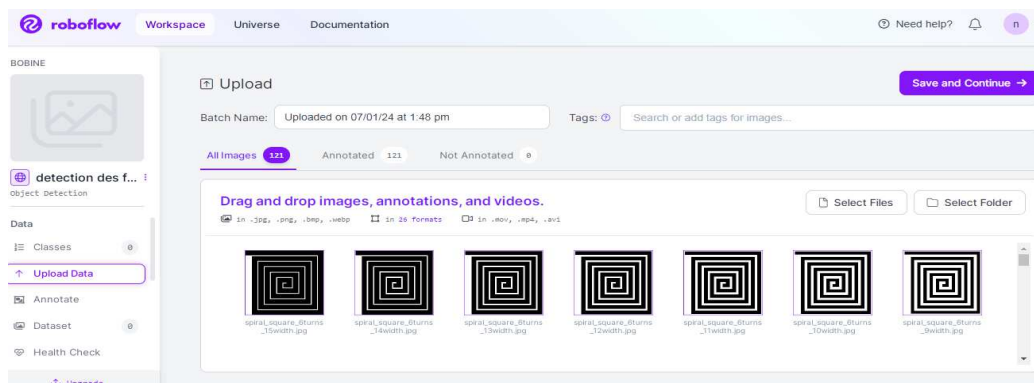


Figure IV 8: Interface de Roboflow avec des données chargées.

4.3 Division des Données :

- Une fois les images et les annotations correctement importées dans Roboflow, nous avons procédé à la division des données en trois ensembles distincts :
 - **80% pour l'entraînement** : Utilisé pour entraîner les modèles, cet ensemble fournit une base solide pour que l'algorithme puisse apprendre à reconnaître les motifs et les caractéristiques des objets à détecter.
 - **15% pour la validation** : Cet ensemble est utilisé pour ajuster les hyperparamètres du modèle et éviter le surapprentissage (overfitting). Il permet de surveiller la performance du modèle pendant l'entraînement.
 - **5% pour les tests** : Ce dernier ensemble est réservé pour évaluer la performance finale du modèle sur des données non vues pendant

l'entraînement. Il permet de mesurer la généralisation du modèle à de nouvelles données.

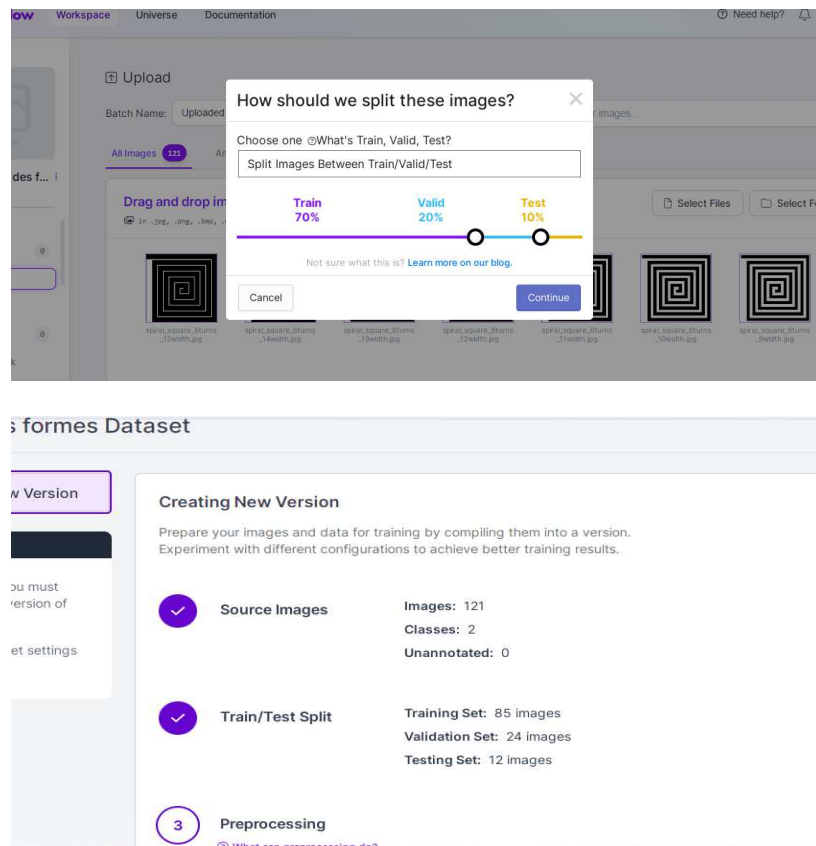


Figure IV 9: Interface de Roboflow avec les données d'entraînement divisées.

4.4 Augmentation des Données :

- Le nombre initial de nos données est de [121]. Afin d'améliorer l'entraînement du modèle, nous avons décidé d'augmenter ce nombre, car une augmentation des données permet généralement d'obtenir de meilleurs résultats en enrichissant la diversité des exemples vus par le modèle.
- Nous avons appliqué les techniques d'augmentation suivantes :
 - Flip (rotation) :** Les images sont retournées horizontalement et verticalement pour augmenter la diversité du dataset.
 - Recadrage (Crop) :** Les images sont recadrées avec un zoom minimum de 0% et un zoom maximum de 40% pour simuler différentes perspectives et tailles.
- Après l'application de ces techniques d'augmentation, (le nombre total de nos données a été multiplié par trois je pense..., voir le capture d'écran) atteignant ainsi [242].

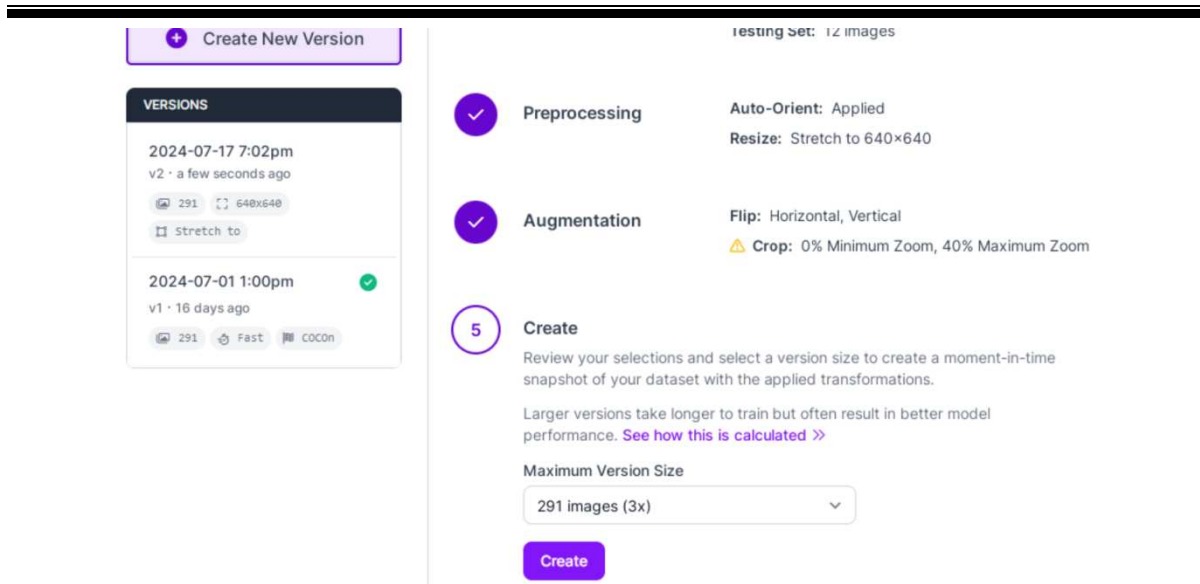


Figure IV 10 : Interface de Roboflow montrant les informations d'augmentation et de prétraitement.

5.L'entraînement des modèles et résultats

Dans cette partie, nous avons utilisé la plateforme Roboflow pour entraîner notre jeu de données avec deux modèles distincts : "Roboflow 3.0" et "YOLO NAS Small". Avant de décrire les performances de chaque modèle, il est essentiel de comprendre les critères d'évaluation utilisés pour mesurer leur efficacité.

5.1 Définitions des Critères d'Évaluation

- **mAP (MeanAveragePrecision)** : La moyenne de précision (mAP) est une métrique utilisée pour mesurer la performance des modèles de vision par ordinateur, en particulier dans les tâches de détection d'objets. Elle est calculée comme la moyenne des précisions moyennes (AveragePrecision, AP) pour chaque classe du modèle. La mAP varie entre 0 et 1, où 1 indique une performance parfaite.
- **Précision (Precision)** : La précision est le ratio des vrais positifs (les instances correctement identifiées par le modèle) par rapport à la somme des vrais positifs et des faux positifs (les instances incorrectement identifiées comme appartenant à la classe). Elle mesure la fréquence à laquelle les prédictions du modèle sont correctes.
- **Rappel (Recall)** : Le rappel est le ratio des vrais positifs par rapport à la somme des vrais positifs et des faux négatifs (les instances que le modèle n'a pas réussi à détecter). Il mesure la capacité du modèle à identifier toutes les instances pertinentes.

Avec ces définitions en tête, examinons les performances des deux modèles utilisés dans notre étude

5.2 Modèle Roboflow 3.0

Le modèle "Roboflow 3.0" a montré une progression notable durant son entraînement. Initialement, la précision moyenne (mAP) du modèle a connu une forte augmentation, avant de fluctuer légèrement. Toutefois, après environ 100 epochs, le mAP a commencé à se stabiliser autour de 0,9, indiquant une assimilation efficace des données. Après 150 epochs, les fluctuations se sont réduites et la précision s'est stabilisée, révélant ainsi une amélioration dans la cohérence des prédictions du modèle. En résumé, le modèle "Roboflow 3.0" a démontré une capacité robuste à détecter les objets avec une performance stable et fiable une fois l'entraînement terminé.

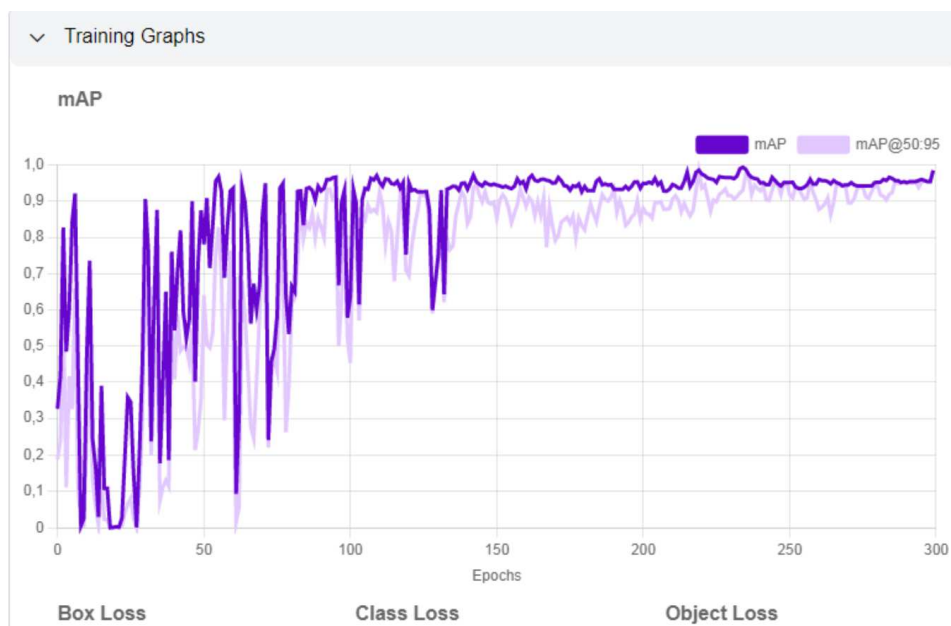


Figure IV 11: Graphe de précision du modèle Roboflow 3.0

5.3 Modèle YOLO NAS Small

Le modèle "YOLO NAS Small" a affiché des performances impressionnantes dès le début de son entraînement. La précision moyenne (mAP) a rapidement atteint des valeurs élevées proches de 1,0 dès les premières epochs, ce qui montre que le modèle a rapidement assimilé les données et atteint une précision exceptionnelle. Contrairement au modèle "Roboflow 3.0", le "YOLO NAS Small" a présenté une stabilité remarquable beaucoup plus tôt, après seulement une dizaine d'epochs. La courbe de précision est restée élevée et stable tout au long de l'entraînement, démontrant une performance continue et homogène avec très peu de variations. En somme, le "YOLO NAS Small" s'est distingué par sa capacité d'apprentissage rapide et une stabilité impressionnante.

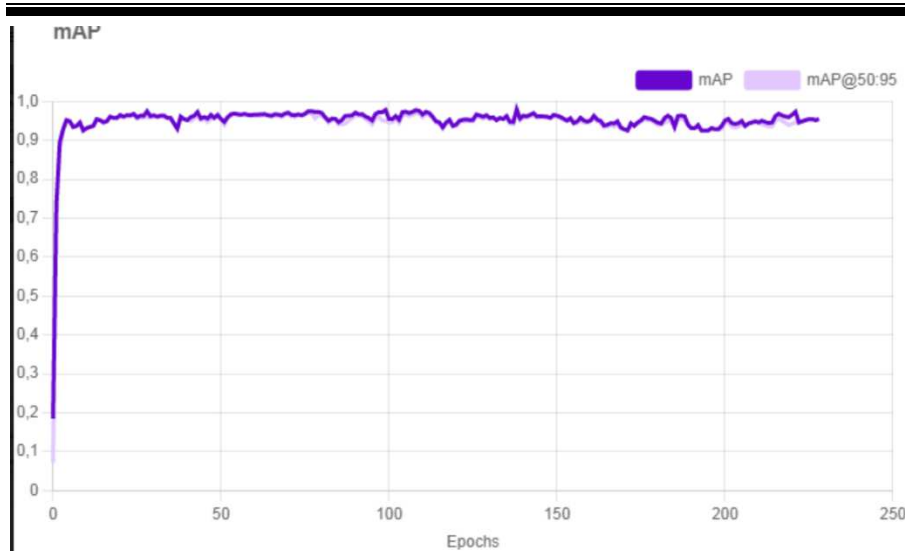


Figure IV 12: Graphe de précision du modèle YOLO NAS Small

6. Performances des modèles

6.1 Comparaison entre le modèle YOLO NAS Small et le modèle Roboflow 3.0 :

Bien que les deux modèles atteignent des niveaux élevés de précision moyenne (mAP), le "YOLO NAS Small" y parvient plus rapidement et avec une plus grande stabilité. Tandis que le "YOLO NAS Small" maintient une performance constante dès les premières époques, le "Roboflow 3.0" présente davantage de fluctuations avant de se stabiliser. De plus, le "YOLO NAS Small" pourrait être plus efficace en termes de temps d'entraînement, puisqu'il atteint sa précision maximale beaucoup plus rapidement par rapport au "Roboflow 3.0". Ainsi, le "YOLO NAS Small" offre non seulement une précision rapide et stable mais également un avantage potentiel en termes de durée d'entraînement.

6.2 Démonstration Visuelle de la Performance des Modèles

On a représenté les résultats sous forme de figures visuelles qui permettent de mettre en évidence les capacités discriminatoires des modèles Roboflow 3.0 et YOLO NAS Small. On a ainsi pu observer que la précision dans la détection des formes circulaires et carrées illustre non seulement l'efficacité des algorithmes d'apprentissage profond.

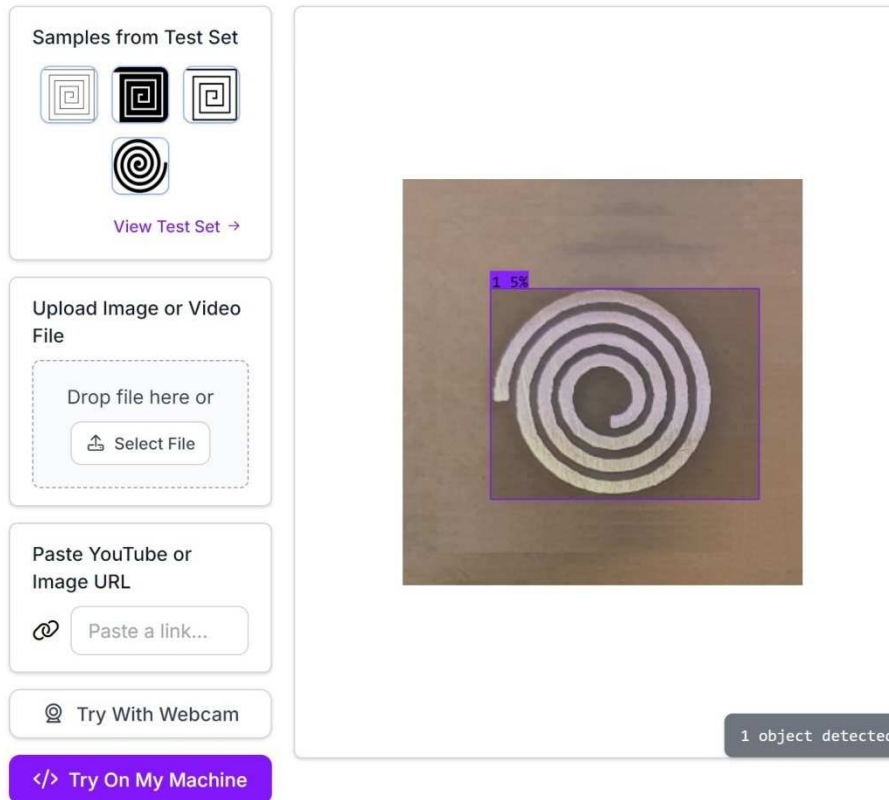


Figure IV 13: Détection d'une Bobine Circulaire par Roboflow 3.0

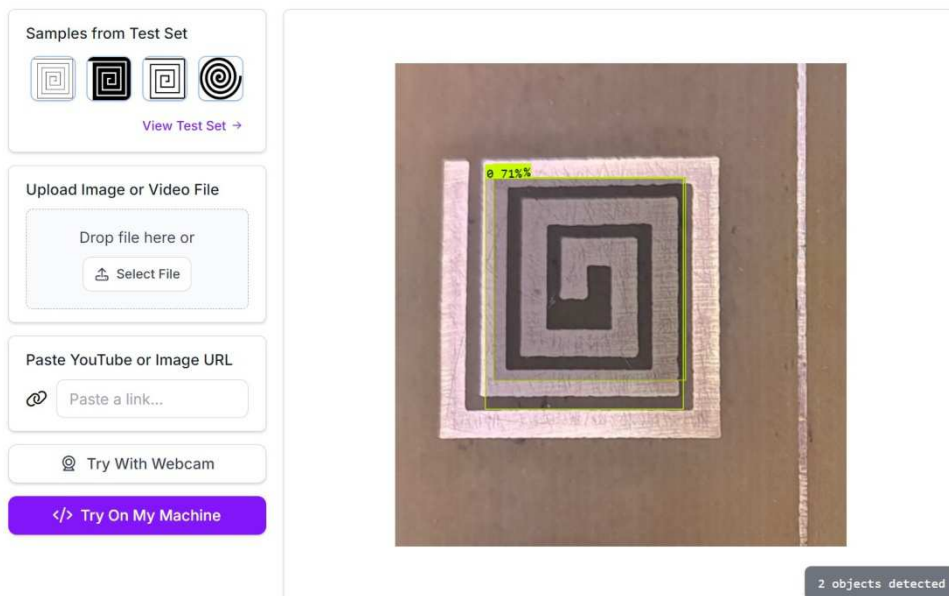


Figure IV 14: Détection d'une Bobine Carrée par Roboflow 3.0

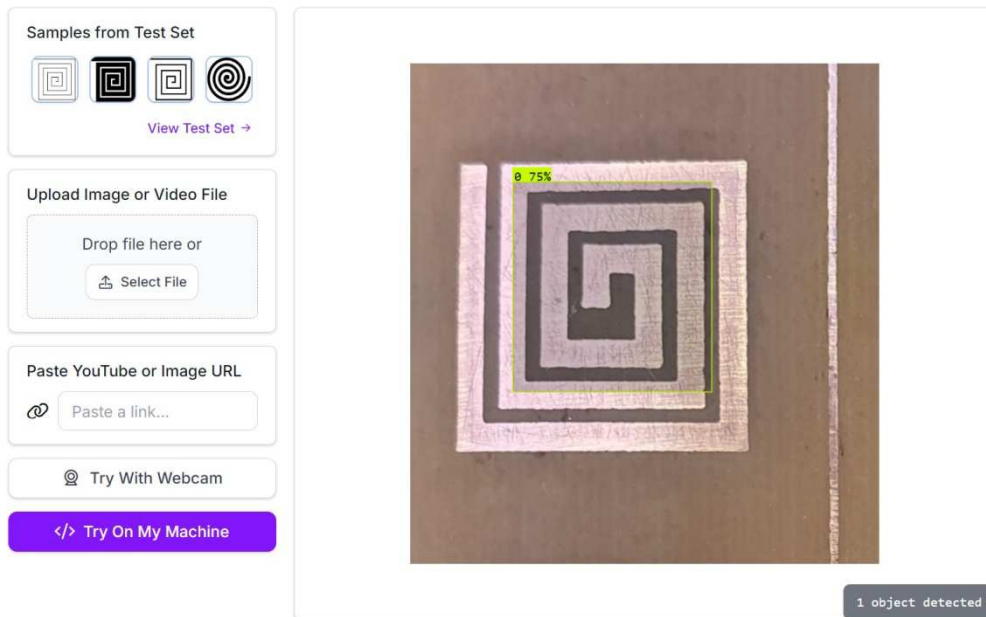


Figure IV 15: Détection d'une Bobine Carrée par YOLO NAS Small

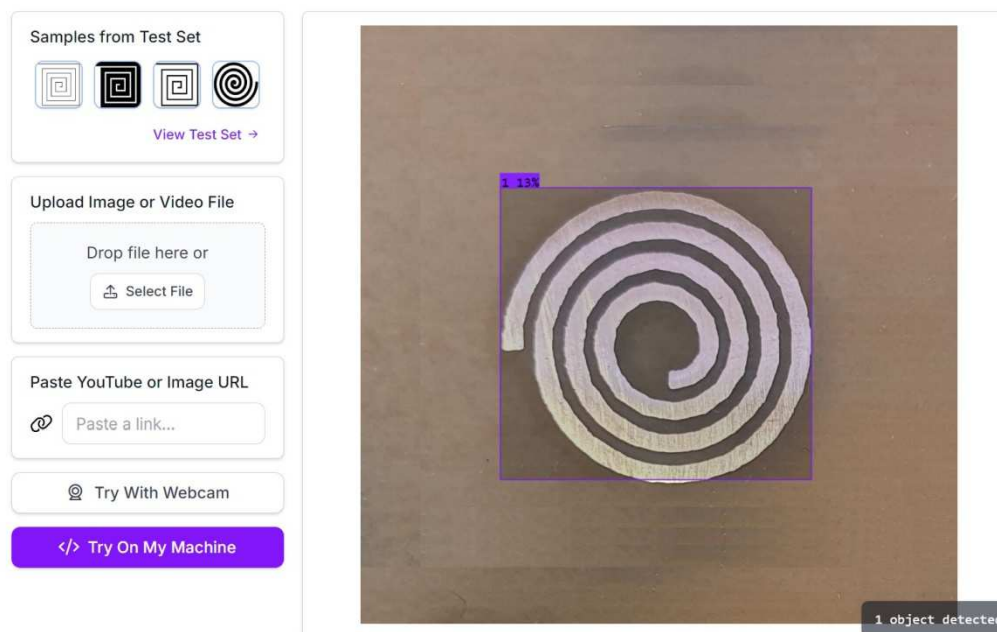


Figure IV 16: Détection d'une Bobine Circulaire par YOLO NAS Small

7. Processus de traitement d'image des bobines

Après avoir utilisé le modèle d'apprentissage profond pour identifier les classes des différentes spirales, chaque image de forme détectée est ensuite traitée individuellement à l'aide d'OpenCV, une bibliothèque de vision par ordinateur largement reconnue. OpenCV, offrant une vaste gamme d'outils et de fonctions pour le traitement des images et des données de mouvement (Mishra et al., 2022), permet de travailler efficacement à l'échelle

des pixels. En utilisant des techniques telles que le filtrage, la détection des bords et la détection des contours, OpenCV facilite l'extraction précise des paramètres géométriques des spirales. Les images des spirales, capturées en vue de dessus avec un appareil photo de téléphone, ont été analysées avec ces outils pour affiner la compréhension et l'analyse des formes détectées.



Figure IV 17: Photo du processus de capture des bobines planaires.

7.1 Conversion en Niveaux de Gris et Réduction du Bruit avec un Flou Gaussien :

Après avoir capturé l'image à l'aide d'un appareil photo de téléphone, l'image sera chargée pour traitement. Le premier traitement consiste à convertir cette image colorée RGB en une image en niveaux de gris en éliminant les informations de couleur. Cela réduit les informations inutiles de l'image et diminue la complexité, en utilisant la fonction `cv2.cvtColor()`.

Une fois l'image convertie en niveaux de gris, un flou gaussien est appliqué pour améliorer la précision de l'opération de seuillage suivante et minimiser l'impact du bruit en lissant l'image. Cela est réalisé en utilisant la fonction `cv2.GaussianBlur()`

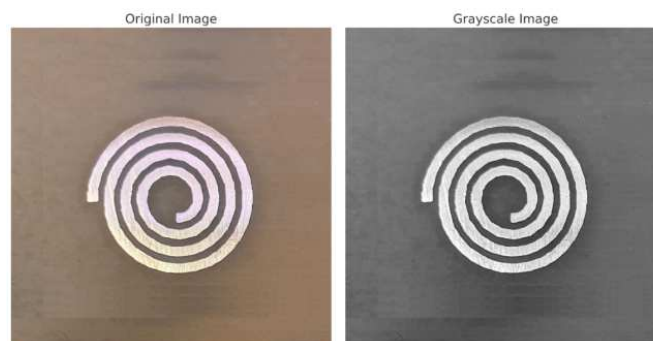


Figure IV 18: Conversion en Niveaux de Gris de bobine circulaire

7.2 Binarisation avec la Méthode de Seuillage d'Otsu

L'image floutée en niveaux de gris est ensuite convertie en une image binaire en utilisant la méthode de seuillage d'Otsu.

Technique de seuillage adaptatif : Cette technique de seuillage adaptatif calcule une valeur de seuil optimale pour séparer l'image de la spirale au premier plan de l'arrière-plan, garantissant une binarisation efficace.

Utilisation de la fonction `cv2.threshold()` : La fonction `cv2.threshold()` est utilisée à cet effet

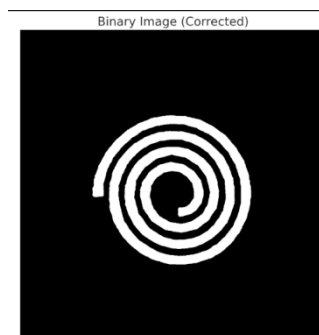


Figure IV 19: Binarisation d'une bobine circulaire

7.3 Traçage de contour

Après avoir converti l'image en une image binaire avec seulement deux couleurs principales, blanc et noir, la détection et le traçage des contours deviennent simplifiés. Cette approche permet d'identifier clairement les limites de la spirale en mettant en évidence ses contours distincts. En utilisant la fonction `cv2.findContours()` sur l'image binaire, il est possible de détecter efficacement ces contours. Cette fonction de la bibliothèque OpenCV facilite l'extraction des contours de l'image, ce qui permet de déterminer les frontières précises de la spirale pour des analyses ou des traitements ultérieurs.



Figure IV 20: traçage de contour d'une bobine circulaire

8. Points d'Intersection et Calcul des Paramètres

La mesure de géométries spécifiques et l'extraction de distances nécessitent la mise en œuvre d'une logique sous forme d'algorithme. Pour cela, des lignes guides ont été conçues afin de faciliter le calcul de ces géométries spécifiques en utilisant la fonction de dessin `cv2.line()`. Une fonction développée sur mesure a été utilisée pour détecter les points d'intersection entre la ligne guide et le contour des spirales, ces points étant ensuite enregistrés et numérotés. Ces étapes permettent de calculer plusieurs paramètres géométriques essentiels de la spirale, tels que :

- **Calcul du diamètre extérieur (d_{ext})** : Le diamètre extérieur de la spirale est calculé par la distance entre les points d'intersection les plus à gauche et les plus à droite.
- **Calcul du diamètre intérieur (d_{in})** : Le diamètre intérieur est calculé en trouvant le premier point à droite et le premier point à gauche près du milieu de la ligne guide.
- **Calcul du nombre de tours (n)** : Le nombre de tours est calculé car chaque ensemble de quatre points d'intersection représente un tour ; donc, le nombre total de points est divisé par quatre pour obtenir le nombre de tours.

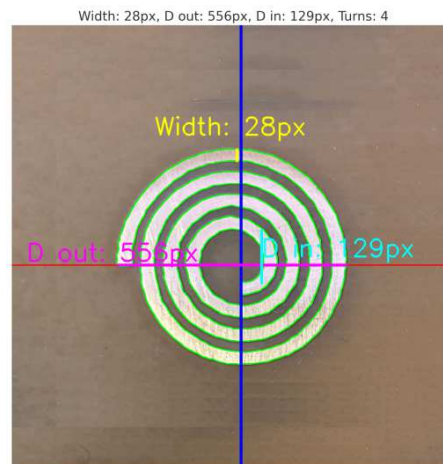


Figure IV 21: mesure de géométries spécifiques et l'extraction de distances d'une bobine circulaire en pixels

$$largeur = distance(i_1, i_2) \quad (9)$$

$$d_{in} = distance(i_{première\ à\ gauche\ au\ milieu}, i_{première\ à\ droite\ au\ milieu}) \quad (10)$$

$$d_{ext} = distance(i_{le\ plus\ a\ gauche}, i_{le\ plus\ a\ droite}) \quad (11)$$

$$n = \left\lfloor \frac{\text{nombre de points d'intersection}}{4} \right\rfloor \quad (12)$$

Ou i_1 et i_2 représentent les premier et deuxième points d'intersection le long de la ligne directrice, $i_{les\ points\ les\ plus\ a\ gauche}$ et $i_{les\ points\ les\ plus\ a\ droite}$ sont les points externes sur les cotés gauche et droit, $i_{première\ a\ gauche\ pré\ du\ milieu}$ et $i_{première\ a\ droite\ pré\ au\ milieu}$, référez-vous aux points d'intersection les plus proches du centre de l'objet de chaque coté.

9. Conversion des pixels en millimètres

Après avoir extrait les paramètres géométriques des spirales en pixels, il est nécessaire de les convertir en millimètres en utilisant un ratio pixel-millimètre. Pour déterminer ce ratio, un objet de référence, tel qu'une pièce de 10 centimes d'euro avec un diamètre connu de 19,75 mm, est utilisé. Il est crucial que l'objet de référence et la spirale soient capturés sous le même angle de caméra et à la même distance pour garantir la précision des mesures. L'image de la pièce est d'abord convertie en niveaux de gris, puis un flou est appliqué pour réduire le bruit avant de procéder à la détection des bords. Le diamètre de la pièce est ensuite mesuré en pixels en utilisant la formule de distance euclidienne pour calculer la distance entre les bords gauche et droit de l'image. Enfin, le ratio pixel-millimètre est calculé en divisant le diamètre réel de la pièce par le diamètre mesuré en pixels, ce qui permet de convertir les dimensions des spirales de pixels en millimètres.



Figure IV 22: Une référence pour le Calcul du ratio pixel-millimètre

$$Ratio(px/mm) = \frac{distance(pixels)}{diamètre\ réel\ (mm)} \quad (13)$$

10. Les paramètres géométriques obtenu

Dans cette section, nous avons calculé les paramètres géométriques des spirales circulaire et carrée capturées, en utilisant le ratio pixel-mm obtenu à partir des images traitées. Le tableau

ci-dessous présente les valeurs obtenues pour le nombre de tours, la largeur en millimètres et en pixels, ainsi que les diamètres extérieur et intérieur pour chaque forme. Ces données servent de base pour la comparaison avec les valeurs théoriques et pour le calcul de l'inductance en utilisant la loi de Mohan.

Tableau 2 : Le ratio pixel-mm obtenu est utilisé pour convertir les valeurs de différents paramètres des spirales pour toutes les formes capturées.

Forme	Nombre de tours (n)	Largeur (mm)	Largeur (px)	d_{ext} (mm)	d_{ext} (px)	d_{in} (mm)	d_{in} (px)
Circulaire	4	0.63	28	12.61	556	2.92	129
Carée	3	1.09	48	11.95	527	2.86	126

10.1. Validation des paramètres géométriques et de la valeur d'inductance

La validation des paramètres géométriques et de la valeur d'inductance est une étape cruciale du processus. Une comparaison est réalisée entre les valeurs d'inductance extraites, calculées en fonction de la géométrie conçue avec le logiciel de CAO, et les valeurs obtenues à partir des résultats générés avec OpenCV. Ces comparaisons sont ensuite présentées dans un tableau, qui met en évidence les différences entre les ensembles de valeurs pour différentes formes. Ce tableau permet d'évaluer l'exactitude des mesures et des calculs effectués, en fournissant une vue d'ensemble des écarts potentiels entre la conception théorique et les résultats pratiques.

Tableau 3 : Comparaison des paramètres géométriques et des valeurs d'inductance : Validation entre les valeurs extraites du logiciel CAO et les résultats calculés avec OpenCV

Forme	D ext		D in		Inductance CV (nH)	Inductance CAD (nH)
	CAD (mm)	CV (mm)	CAD (mm)	CV (mm)		
Circulaire	12.5	12.61	3	2.92	113.24	114.13
Carrée	11.8	11.95	2.8	2.86	57.55	56.62

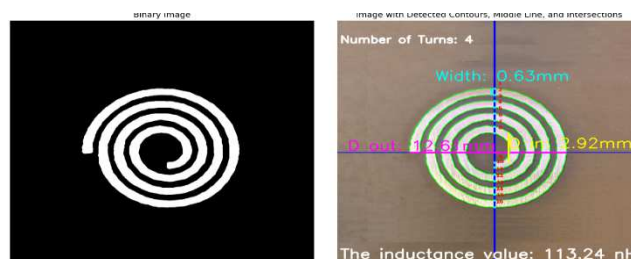


Figure IV 23: mesure de géométries spécifiques et l'extraction de distances d'une bobine circulaire en mm avec le calcul d'inductance

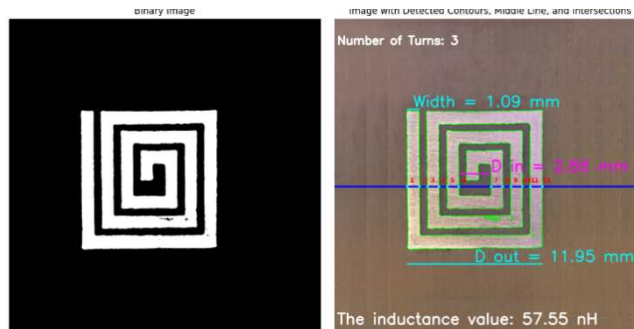


Figure IV 24 :mesure de géométries spécifiques et l'extraction de distances d'une bobine carrée en mm avec le calcul d'inductance

10.2 Interprétation des images et de tableau

La précision des paramètres géométriques extraits par OpenCV est remarquablement élevée, ce qui se traduit par une bonne précision dans l'estimation de la valeur de l'inductance. Ces résultats démontrent l'efficacité des techniques de mesure à haute résolution employées, essentielles pour des évaluations approfondies dans des contextes d'ingénierie de précision et de contrôle qualité. Cependant, il est important de noter que la différence entre les valeurs obtenues par la méthode de vision par ordinateur et celles dérivées de la géométrie de conception peut être attribuée aux écarts inévitables entre les dimensions physiques réelles des bobines et les valeurs théoriques de conception logicielle. Les variations dans le processus de fabrication et les dimensions physiques peuvent entraîner des divergences entre les paramètres de conception et les valeurs mesurées. Néanmoins, les résultats montrent un bon accord global entre les valeurs d'inductance, et les incohérences mineures, dues à la granularité des mesures basées sur les pixels, ont un impact minime sur les calculs d'inductance en nanohenries. Cela confirme que la méthode de vision par ordinateur est une approche fiable pour établir les valeurs d'inductance avec précision.

Conclusion :

Les résultats de l'implémentation de la méthode d'extraction des géométries des bobines ont montré son efficacité et sa pertinence pour les processus industriels. Cette approche a permis d'atteindre des performances accrues, notamment en réduisant les erreurs et les temps de traitement, tout en facilitant l'intégration dans les chaînes de production existantes. Cependant, il est important de souligner que le succès de cette méthode repose sur une configuration initiale soignée et une adaptation continue aux spécificités opérationnelles. Des ajustements constants seront nécessaires pour maximiser ses avantages et garantir une performance optimale sur le long terme.

Conclusion générale :

Cette étude a démontré avec succès l'efficacité de l'intégration des techniques de vision par ordinateur et d'apprentissage profond pour le calcul de l'inductance des bobines planaires, en utilisant des outils de pointe tels que YOLO NAS et Robotflow 3.0, associés à la bibliothèque OpenCV. L'application de ces technologies a permis non seulement une reconnaissance précise des formes de bobines, mais également une extraction fiable des paramètres géométriques essentiels pour le calcul de leur inductance. Le modèle IA a offert une détection rapide et précise des différentes configurations de bobines, tandis que OpenCV a facilité l'extraction fine des dimensions géométriques à partir des images traitées. Les résultats obtenus montrent une précision dans l'extraction des paramètres géométriques, ce qui est particulièrement crucial pour les applications industrielles où les tolérances doivent être respectées avec rigueur. Cette précision garantit que les valeurs d'inductance calculées sont fiables, améliorant ainsi le contrôle qualité des bobines planaires intégrées dans divers dispositifs électroniques.

Référence :

- [1] M^{elle} slimani dounyazad / M^{elle} ammouche saida , (24/09/2017) ,(Modélisation et Etude du comportement électromagnétique d'une bobine à air, en basses et hautes fréquences) [mémoire de master], Université Akli Mohand Oulhadj ,Bouira
- [2] https://www.bricodepot.fr/catalogue/construction-renovation/plomberie/alimentation-en-eau/tube-raccord-multicouche/#p2_n50_srelevancy
- [3] Melle slimani dounyazad / M^{elle} ammouche saida , (24/09/2017) ,(Modélisation et Etude du comportement électromagnétique d'une bobine à air, en basses et hautes fréquences) [mémoire de master], Université Akli Mohand Oulhadj ,Bouira
- [4]<http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/20410/MPHY93.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- [5] M^r NAMOUNE ABDELHADI (2010). (DIFFERENTES METHODES DE DIMENSIONNEMENT D'UNE INDUCTANCE PLANAIRE INTEGREE).[mémoire de magister]. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF
- [6] Walt Jung, " Op Amp applications handbook ", (Analog Devices series) ISBN 0-7506-7844-5.
- [7] Théodore Wildi, Electrical machines, drives, and power systems, 6th edition, Upper Saddle River, N.J., Pearson Prentice Hall, 2006, 934 p. (ISBN 9780131776913).
- [8] Théodore Wildi et Gilbert Sybille, Électrotechnique, 4e édition, Québec, Presse de l'Université Laval / De Boeck, 2005, 1215 p. (ISBN 9782763781853).
- [9] Hassenzahl, W.V., "Applied Superconductivity, Superconductivity, an enabling technology for 21st century power systems?", IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1447-1453, Volume: 11, Issue: 1, Mar 2001.
- [10] Sinclair, Ian Robertson (2001). Sensors and transducers, 3rd Ed. Newnes. pp. 69–70. ISBN 0750649321.
- [11] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," SCIENCE, vol.

317, July 2007.

- [12] D. Trichet, “Contribution à la modélisation, à la conception et au développement du chauffage par induction des matériaux composites,” Thèse de doctorat, École Doctorale Sciences pour l’ingénieur de Nantes, 2000.
- [13] M. Bechiche, F. Benmoussa, Dimensionnement d’une inductance planaire spirale, Mémoire de Master en Electrotechnique, 27 juin 2009.
- [14] André DUCLUZAUX, Schneider Electric 2022.
- [15] Hayt, William H. (1989), Engineering Electromagnetics (5th ed.), McGraw-Hill, ISBN 0070274061.
- [16] <https://www.kukcoils.fr/bobines-et-%C3%A9lectronique-miniaturis%C3%A9es-pour-la-technologie-m%C3%A9dicale-et-les-capteurs>
- [17] <https://www.electricity-magnetism.org/fr/solenoid-a-cadre/>
- [18] M^{elle} MELATI RABIA ,(2013).conception d’un nouveau modele d’inductance intégrée [mémoire de doctorat] université UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE D’ORAN MOHAMED BOUDIAF, Oran
- [19] M^{elle} HAMOUR NOURA ,(2016).étude de simulation des effets électromagnétique dans les micro bobine .[mémoire de master]. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
- [20] M^r MIMOUNI REDOUANE ,(2012) .intégration d’une bobine dans une alimentation a decoupage [mémoire de magister]. Université des Sciences et de la Technologie d’Oran MOHAMED BOUDIAF
- [21] <https://www.kukcoils.fr/bobine-torique-sp%C3%A9cifique-au-client>
- [22] M^{elle} GHISLAIN TROUSSIER ,(2004),intégration de bobine sur silicium pour la conversion d’énergie [these]. INSA de Toulouse, 2004
- [23] M^r LAIDI ABDELLAH , (2022), Conception et caractérisation de micro-bobine planaire intégrée dédiée à la conversion de l’énergie .[mémoire de doctorat], Université Ahmed Draïa Adrar

- [24] https://fr.wikipedia.org/wiki/Bobine_%28%C3%A9lectricit%C3%A9%29
- [25] <https://oscahr.unistra.fr/billets/quelles-ont-%C3%A9t%C3%A9-les-utilisations-de-la-bobine-au-fil-du-temps>
- [26] <https://oscahr.unistra.fr/billets/la-bobine-de-ruhmkorff-prouesse-technologique-du-xix%C3%A8me-si%C3%A8cle>
<http://www.lyrfac.com/soutiens/>
- [27] <https://oscahr.unistra.fr/billets/la-bobine-de-ruhmkorff-prouesse-technologique-du-xix%C3%A8me-si%C3%A8cle>
<http://www.lyrfac.com/>
- [28] <https://datascientest.com/quelle-difference-entre-le-machine-learning-et-deep-learning>
- [29] <https://www.zendesk.fr/blog/machine-learning-and-deep-learning/>
- [30] <https://www.aquiladata.fr/insights/classification-dimages-et-detection-dobjets-par-cnn/>
- [31] <https://www.slideshare.net/slideshow/deep-learning-application-la-reconnaissance-dobjets-de-classes-multiples-sur-les-images-et-les-vidos/250155443>
- [32] <https://www.innovatiana.com/post/object-detection-our-guide>
- [33] <https://www.imaios.com/fr/ressources/blog/introduction-aux-architectures-d-apprentissage-automatique-profond-les-plus-courantes-pour-la-detection-d-objets-en-imagerie-medicale>
- [34] <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/15719/1/m%C3%A9moire.pdf>
- [35] <https://geekflare.com/fr/regression-vs-classification/>
- [36] <https://www.jedha.co/formation-ia/regression-lineaire-machine-learning>
- [37] <https://www.youtube.com/watch?v=Ee8gLwVCPxg>
- [38] <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/supervised-learning>
- [39] projectpro. Introduction to convolutional neural networks architecture, 2023. URL https://www.projectpro.io/article/introduction-to-convolutional-neural-networks-algorithm-architecture/560#mcetoc_1fs0joo1hg.
- [40] Kimia Nadjahi Pascal Monasse. Découvrez les différentes couches d'un cnn, 2022. URL <https://openclassrooms.com/fr/courses/4470531-classez-et-segmentez-des-donnees-visuelles/5083336-decouvrez-les-differentes-couches-dun-cnn>.

- [41] Nebojša Bačanin Džakula et al. Convolutional neural network layers and architectures. In Sinteza 2019-International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research, pages 445–451. Singidunum University, 2019.
- [42] Pratik Ahamed, Soumyadeep Kundu, Tauseef Khan, Vikrant Bhateja, Ram Sarkar, and Ayatullah Mollah. Handwritten arabic numerals recognition using convolutional neural network. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 11 2020. doi:10.1007/s12652-020-01901-7.
- [43] Mesbah Fethia , Détection d'objets par Deep Neural Network à l'aide du modèle YOLO en temps réel, mémoire de Master , Informatique , Université 8 Mai 1945, 2021
- [44] R. Kundu, “YOLO : Algorithm for Object Detection Explained [+Examples],” V7, Apr. 20, 2023. <https://www.v7labs.com/blog/yolo-object-detection#what-is-yolo>
 . Juin 2023
- [45] Zhang, Youshan. (2023). Stall Number Detection of Cow Teats Key Frames
- [46] <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/24943/1/m%C3%A9moire%20finale.pdf>
- [47]<https://fr.linkedin.com/advice/0/what-some-latest-developments-challenges-yolo-research?lang=fr>
- [48] <https://larevueia.fr/yolo-nas/>
- [49] W. Nitinuntatip, K. Wattanasuk, A. Dersingh, J. Rojanarowan, W. Plodpradista, J. Kongthon, V. Patanavijit, A. Bhattarai, and M. E. Ali, “Object recognition system for visual impairment,” 2022
- [50] G. Van Rossum, B. Warsaw, and N. Coghlan, “Pep 8–style guide for python code,” *Python. org*, vol. 1565, p. 28, 2001.
- [51] M. J. d. L. Magalhães, *Augmented reality over maps*. PhD thesis, 2020.
- [52] F. BAHADJ, M. BELLAOUI, et al., *Extraction de la Température de Surface de la Terre à Partir d’une Image Satellitaire*. PhD thesis, Université Ahmed Draia-ADRAR, 2015.
- [53] Maïtine Bergounioux, " Introduction au traitement mathématique des images – méthodes déterministes", Edition Springer, 2015.
- [54] H. Yacine and M. Silia, *Véhicule intelligent pour la détection des plaques d’immatriculation suspectes*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2019.

[55] M. R. B. E. L. Taha and M. A. L. Aymen, Détection et lecteur de Qr code avec OpenCV. PhD thesis, Faculté des Sciences et Technologies, 2021.

[56] J. Weber, Segmentation morphologique interactive pour la fouille de séquences vidéo. PhD thesis, Université de Strasbourg, 2011.

[57] R. AHMED, “Stéganographie d’images à l’aide de l’apprentissage automatique,”

[58] BERBARA Ahmed, SAYAH DJEBBOUR Hassan « détection et localisation de caractères de codes à barres de type EAN 13 » PFE 2009, SAAD DAHLEB Blida.