

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université de Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الإلكترونيات

Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Domaine : Sciences et de la Technologie ; Filière : Électrotechnique ; Spécialité : Commandes Électriques

Thème

Analyse expérimentale des émissions électromagnétique d'un variateur de vitesse commande par NE555

Présenté par :

- 1) Melle HAMEL OUM ELKHEIR
- 2) Melle AMER BEN BEKRIT IKRAM

Devant le jury :

Dr ALLAM MOHAMED	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr ATTOU Amine	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr BENAZZA Baghdad	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier **ALLAH** le Tout-Puissant qui nous a donné la force, la patience et le courage pour accomplir ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant, **Dr BENAZZA BAGHDADI**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son orientation constante et la confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce projet.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail, de le juger avec impartialité et d'honorer notre soutenance de leur présence.

Nous tenons à saluer et remercier notre chef de département, **MR. ADJOU DJ**, ainsi que **MR. AOUIMEUR** pour ses conseils avisés et son précieux soutien.

Nous souhaitons particulièrement remercier tous **les enseignants** du département qui nous ont accompagnés durant notre cursus universitaire.

Enfin, nos remerciements les plus chaleureux s'adressent à nos familles respectives et à nos amis pour leur soutien indéfectible.

De peur d'avoir oublié quelqu'un, nous souhaitons remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de notre parcours.

Dédicace

*Tout d'abord, je remercie le **Dieu**, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste*

Je dédie ce travail

*A **ma mère**, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite , pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie .*

*A **mon père**, que je le remercie énormément pour ses efforts, ses conseils et sa surveillance.*

*A **mon fiancé** , pour sa patience son encouragement et sa présence à mes cotés dans les moments les plus importants.*

*A **mes soeurs**, pour leur affection leur soutien et leur présence réconfortante .*

*A **mes amis d'études** , pour les moments partagés, l'entraide et les souvenirs inoubliables.*

A tous, merci ...

HAMEL OUM ELKHEIR

Dédicace

*Avant tout, je remercie le **Dieu** le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail*

Je dédie ce travail

*A mes très chers parents ,**BAKHTA** et **MOHAMED***

*Aini qu'à chère soeur **AIDA**.*

*Mon cher frère **YACINE**.*

*A toute ma famille **AMER BEN BEKRIT**.*

A tous mes amis , et à tous ceux qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de mon parcours .

AMER BEN BEKRIT IKRAM

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abreviations	
Introduction générale.....	1
<u>Chapitre I : Généralités sur la compatibilité électromagnétique (CEM)</u>	
Introduction	4
I.1.Définition de la CEM :	5
I.2.Importance de la CEM dans les systèmes électroniques :	5
I.3.Objectifs de la CEM :	5
I.4.Principes fondamentaux de l'électromagnétisme :	6
I.4.1.Champs électriques et magnétiques :	6
I.4.1.1Champ électrique :	6
I.4.1.2.Champ magnétique :	6
I.4.1.3. Relation entre champ électrique et magnétique :	6
I.4.1.4 Application en compatibilité électromagnétique (CEM) :	7
I.4.2.Ondes électromagnétiques :	7
I.4.2.1.Définition :	7
I.4.2.2.Principe de propagation :	7
I.4.2.3.Caractéristiques principales :	7
I.4.2.4.Spectre électromagnétique :	8
I.4.2.5.Sources des ondes électromagnétiques :	8
I.4.2.6.Rôle des ondes électromagnétiques dans la CEM :	9
I.4.3.Propagation des perturbations :	10
I.4.3.1.Modes de propagation :	10
I.4.3.2.Facteurs influençant la propagation :	10
I.4.3.3.Mesures correctives :	11
I.5.Sources de perturbations électromagnétique :	11
I.5.1.Sources naturelles :	11
I.5.1.1.Le rayonnement solaire :	12
I.5.1.2.La foudre :	12
I.5.1.3.Les tempêtes géomagnétiques :	12
I.5.2.Sources industrielles :	13
I.6.Perturbations générées par l'électronique de puissance :	14
I.6.1.Origine des perturbations :	14
I.6.2.Types de perturbations :	14

I.6.2.1.Perturbations conduites :	14
I.6.2.2.Perturbations rayonnées :	15
I.6.2.3.Bruit électromagnétique :	15
I.7.Mécanismes de couplage électromagnétique :	16
I.7.1.Couplage capacitif :	16
I.7.1.1.Définition :	16
I.7.1.2.Mesures correctives :	17
I.7.2.Couplage inductif :	18
I.7.2.1.Définition :	18
I.7.2.2.Mesures correctives :	18
I.7.3.Couplage par rayonnement :	19
I.7.3.1. Définition :	19
I.7.3.2.Mesures correctives :	20
I.7.4.Couplage par conduction :	20
I.7.4.1.Définition :	20
I.7.4.2.Le mode différentiel :	21
I.7.4.3.Le mode commun :	21
I.7.4.4.Mesures correctives :	22
I.8. Comptabilité électromagnétique dans les variateurs de vitesse :	22
I.8.1.Sources d'émissions électromagnétique dans les variateurs de vitesse :	23
I.8.2.Influence de la commutation rapide :	23
I.9. Normes et réglementations CEM :	24
I.9.1.Normes internationales :	24
I.9.2. Limites d'émission électromagnétique :	25
I.10.Méthodes de réduction des interférences :	26
I.10.1.Blindage électromagnétique :	26
I.10.2.Câbles blindés :	26
I.10.3.Mise à la terre (MALT) :	27
I.10.4.Filtrage :	27
Conclusion :	28
<u>Chapitre II : Variateur MLI et étude problématiques CEM</u>	
Intoduction :	30
II.1.1.Définition Moteur courant continu :	30
II.1.2.Description d'un moteur à courant continu :	31
II.1.3 Caractéristiques générales d'un moteur a courant continu :	31
II.1.4.Modélisation d'un moteur à courant continu :	32
II.2. Variateur de vitesse pour moteur CC:	32

II.2.1 Définition variateur de vitesse :	32
II.2.2 Structure générale d'un variateur de vitesse pour moteur CC:	33
II.2.3.Principe de fonctionnement Variateur de vitesse pour moteur à courant continu (CC):	34
II.3 Principe de la modulation MLI:	36
II.3.1.MLI:	36
II.3.2.Principe la commande MLI:	36
II.3.3 Rapport cyclique:	37
II.3.4.Fonctionnement :	38
II.3.5.Principaux avantages :	38
II.3.6.Principe général de fonctionnement :	38
II.4.Présentation du circuit NE555 timer IC:	39
II.4.1Définition :	39
II.4.2.Constitution de NE555 :	40
II.4.3.Fonctionnement des montages monostable et astable :	40
II.5. Sources de perturbations dans les convertisseurs statiques :	42
II.5.1.Structure générale d'un convertisseur :	42
II.5.2. Mécanismes de génération des perturbations :	42
II.5.3.Analyse selon le type de variateur CC:	43
II.5.4.Les modes de propagation des perturbations:	43
II.5.5. Techniques d'atténuation des perturbations:	44
II.5.6. Synthèse pour le moteur à courant continu CC):	45
II.6. Impact des commutations rapides (dv/dt , di/dt) :	45
II.6.1.Impact du dv/dt (Variation de tension) :	45
II.6.2. Impact du di/dt (Variation de courant) :	46
II.6.3. Synthèse des effets :	46
II.7.Analyse des perturbations conduites et rayonnées :	47
II.7.1 Origine des perturbations dans les variateurs de vitesse:	47
II.7.2. Source de perturbations :	48
II.7.3. Perturbations conduites:	48
II.7.4. Perturbations rayonnées:	49
II.7.5. Effets des perturbations électromagnétiques sur les équipements voisins :	49
II.8.Les inconvénients des variateurs de vitesse :	50
II.9.Les avantages des variateurs de vitesse :	51
Conclusion :	51

Chapitre III: Réalisation expérimentale du variateur et étude CEM

Introduction	52
III.1 La description du montage du variateur de vitesse	52
III.1.1 Constitution générale du montage	54
III.1.2 Lecture globale du fonctionnement :	57
III.1.3 Fonctionnement du NE555 dans le montage :	57
III.2 Description synthétique du câblage :	58
III.3 Interprétation du fonctionnement :	58
III.4. Interprétations des résultats :	59
III.4.1. La sortie de la capacité du variateur de vitesse seul sans charge :	59
III.4.2. La tension de sortie du variateur de vitesse seul sans charge (Avec câble d'alimentation) :	61
III.4.2.1 Interprétation du signal temporel :	61
III.4.2.2 Interprétation du spectre fréquentiel en dB :	62
III.4.3. La tension de sortie du variateur de vitesse seul sans charge (Sans câble d'alimentation).....	63
III.4.3.1. Interprétation de la courbe temporelle :	65
III.4.3.2. Interprétation du spectre fréquentiel en dB :	67
III.4.3. La tension de sortie du variateur de vitesse en charge (Avec câble coaxial) :	68
III.4.3.1. Interprétation temporelle :	68
III.4.3.2. Interprétation fréquentielle :	70
III.4.4. La tension de sortie du variateur de vitesse en charge (Sans câble coaxial) :	70
III.4.4.1. Interprétation temporelle :	71
III.4.4.2. Interprétation fréquentielle :	72
Conclusion :	73
Conclusion générale	75
Références bibliographiques :	77

Liste des figures

Figure I.1 : Spectre électromagnétique et ses applications	8
Figure I.2 : Classification des sources des ondes électromagnétiques selon leur origine naturelle, artificielle et industrielle	9
Figure I.3: Schéma de propagation des émissions électromagnétiques d'un variateur NE555 vers l'environnement	9
Figure I.4 : Facteurs influençant la propagation des perturbations électromagnétiques, incluant la fréquence, le type de couplage, le câblage, le blindage et l'environnement électromagnétique	11
Figure I.5: Schéma illustrant les principales sources naturelles de perturbations électromagnétiques : le rayonnement solaire, la foudre et les tempêtes géomagnétiques	13
Figure I.6: Les sources industrielles de perturbations électromagnétiques	13
Figure I.7: Représentation du bruit électromagnétique et de ses deux types principaux	16
Figure I.8: Transmission des perturbations entre la source et l'équipement victime	16
Figure I.9: Exemple de couplage capacitif	17
Figure I.10: Les câbles blindés ou avec écran minimisent le couplage capacitif	18
Figure I.11: Exemple de couplage inductif	18
Figure I.12: Exemple de couplage par rayonnement	19
Figure I.13: Exemple de couplage par rayonnement	20
Figure I.14: Couplage par conduction.....	21
Figure I.15: Mode différentiel.....	21
Figure I.16: Le mode commun	21
Figure I.17: Schéma illustratif du blindage électromagnétique (cage de Faraday et câbles blindés) ..	26
Figure I.18: Câbles blindés, principe et structure et protection contre les interférences électromagnétiques	27
Figure I.19: Mise à la terre (MALT)	27
Figure I.20 : Filtrage des perturbations.....	28
Figure II.1: Convertisseur de l'énergie dans un moteur à courant continu.....	31
Figure II.2 : Schéma de constitution d'un moteur à courant continu	31
Figure II.3 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu	32
Figure II.4: Structure générale d'un variateur de vitesse	33
Figure II.5 : Schéma de principe d'un variateur de vitesse pour moteur à courant continu.....	35
Figure II.6 : Rapport cyclique MLI	36
Figure II.7 : Réalisation du signal MLI	37
Figure II.8 : Variation du rapport cyclique	37
Figure II.9: Génération du signal MLI	38
Figure II.10 : Brochage du circuit NE555	39
Figure II.11: Diagramme fonctionnel interne du circuit intégré NE555	40
Figure II.12: Déclenchement de monostable	40
Figure II.13 : Déclenchement de monostable	41
Figure II.14 : Modes de fonctionnement du NE555 (Monostable et Astable)	41
Figure II.15 : Schéma synoptique de la structure générale d'un convertisseur de puissance	42
Figure II.16 : Synoptique d'une chaîne de conversion avec hacheur et liaisons par câbles blindés.....	43
Figure II.17 : Prépondérance du mode commun sur le mode différentiel	44
Figure II.18 : Types de perturbations électromagnétiques (conduites et rayonnées)	47
Figure II.19 : Formes d'onde d'un hacheur MLI	48
Figure II.20 : Propagation des perturbations conduites en mode différentiel et mode commun	49
Figure II.21 : Schéma d'une chaîne d'entraînement avec RSIL et plan de masse	49
Figure III.1 : Montage du variateur de vitesse.....	53
Figure III.2 : Montage expérimental du variateur de vitesse	53

Figure III.3 : Bloc de commande (générateur MLI à base de NE555) utilisé dans les expériences. ...	54
Figure III.4 : Réponse temporelle de la Charge et décharge d'une capacité	59
Figure III.5 : Réponse fréquentielle de la Charge et décharge d'une capacité	60
Figure III.6 : Réponse temporelle du signal de sortie de l'oscillateur à vide. (Avec câble d'alimentation)	61
Figure III.7 : Réponse fréquentielle du signal de sortie de l'oscillateur à vide. (Avec câble d'alimentation)	62
Figure III.8 : Réponse fréquentielle du signal de sortie de l'oscillateur à vide. (Avec câble d'alimentation)	63
Figure III. 9 : Réponse fréquentielle. du signal de sortie de l'oscillateur sans charge (Sans câble d'alimentation).	65
Figure III.10 : Représentation schématique des capacités internes d'un MOSFET	66
Figure III.11 : Signal temporel du variateur MLI à bas de NE555 avec moteur CC en charge.....	69
Figure III.12 : Spectre fréquentiel du signal MLI à bas de NE555 avec moteur CC en charge	69
Figure III.13 : Réponse temporelle de la tension du variateur de vitesse en charge sans câble coaxial	71
Figure III.14 : Réponse fréquentielle de la tension du variateur de vitesse en charge.....	71

Liste des tableaux

Tableau I.1: Impact des communications rapides sur les performances, les risques et les solutions dans domaines technologiques.	24
Tableau II.1: Description des broches du circuit NE555.....	39
Tableau II.2: Résumé des phénomènes, conséquences et solutions liés aux commutations rapides..	46
Tableau III.1 : Les broches du NE555.....	58
Tableau III.2 : Causes des surtensions en commutation.....	65
Tableau III.3 : Causes combinées des surtensions dans une charge inductive.....	68

Liste des abreviations :

Snubber RC : Circuit d'amortissement Résistance-Condensateur utilisé pour limiter les surtensions et le dv/dt dans les circuits de puissance

NE555 : Circuit intégré Timer 555 utilisé pour générer des signaux MLI

CC : Courant continu

EMI : Electromagnetic Interference (Interférences électromagnétiques)

CEM : Compatibilité Électromagnétique.

Filtres EMI : Filtres d'interférences électromagnétiques.

Filtres CEM industriels : Filtres de compatibilité électromagnétique.

IEC : International Electrotechnical Commission.

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ISO : International Organization for Standardization.

Normes IEC : Normes de la Commission Électrotechnique Internationale.

MOSFET : Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.

CTP : Coefficient de Température Positif (thermistance PTC).

Bus CC : Bus Courant Continu.

Liaison DC : Direct Current Link (liaison courant continu).

Filtre LC : Inductance (L) + Condensateur (C).

Filtre RC : Résistance (R) + Condensateur (C).

HF : Haute Fréquence.

Bruit HF : Bruit Haute Fréquence.

LAN : Local Area Network (réseau local).

IEC 61000 : Norme CEM (immunité et émissions électromagnétiques).

IEC/EN 61800-3 : Norme CEM pour variateurs de vitesse.

CISPR : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.

CISPR 11 / EN 55011 : Appareils industriels, scientifiques et médicaux.

CISPR 22 / EN 55032 : Équipements multimédia / IT.

CISPR 32 : Compatibilité électromagnétique des équipements multimédia.

CISPR 14 : Appareils électroménagers.

ISO 7637 : Perturbations électriques dans les véhicules.

Onduleur (IGBT/MOSFET) : Convertisseur utilisant des transistors IGBT ou MOSFET.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

Vcc : Tension d'alimentation positive

AC : Alternating Current (Courant alternatif)

VSD : Variable Speed Drive (Variateur de vitesse)

PLC : Programmable Logic Controller (Automate programmable industriel)

RS485 : Standard de communication série industrielle

Cgd : Capacité grille-drain (effet Miller)

VBR : Tension de claquage

V/m : Volt par mètre (champ électrique)

A/m : Ampère par mètre (champ magnétique)

FFT : Transformée de Fourier Rapide

dB : Décibel

LOW : État logique bas / Niveau bas de tension

HIGH : État logique haut / Niveau haut de tension

Ciss : Capacité d'entrée du MOSFET

Coss : Capacité de sortie du MOSFET

Ron : Résistance interne du MOSFET à l'état passant

Cgs : Capacité Grille-Source (Gate-Source)

Cgd : Capacité Grille-Drain (Gate-Drain ou Capacité de Miller)

Cds : Capacité Drain-Source (Drain-Source)

Crss : Capacité de transfert inverse du MOSFET

Introduction générale

Introduction générale

L'essor des systèmes électroniques et de l'électronique de puissance a profondément transformé les domaines industriel, domestique et tertiaire. L'intégration massive des variateurs de vitesse dans ces environnements répond à des exigences croissantes d'efficacité énergétique, de performance dynamique et de fiabilité des équipements. En permettant l'ajustement précis de la vitesse des moteurs électriques en fonction des besoins réels, ces dispositifs contribuent à réduire la consommation d'énergie, à limiter les contraintes mécaniques et à prolonger la durée de vie des installations [1, 2].

Parmi les techniques de commande les plus répandues, la modulation de largeur d'impulsion (MLI) occupe une place centrale. Cette méthode consiste à contrôler la puissance transmise à une charge en faisant varier le rapport cyclique d'un signal périodique à fréquence fixe. Pour des applications simples, pédagogiques et économiques, le célèbre circuit intégré NE555 est fréquemment utilisé en mode astable afin de générer un signal MLI. Sa simplicité de mise en œuvre, son faible coût et sa robustesse en font un choix privilégié pour la commande de petits variateurs de vitesse [2].

Cependant, les commutations rapides inhérentes à la MLI engendrent des variations brusques de tension (dv/dt) et de courant (di/dt). Ces transitions rapides sont à l'origine d'émissions électromagnétiques parasites (EMI – Electromagnetic Interference), susceptibles de perturber les équipements électroniques voisins par conduction ou par rayonnement. Dans un environnement de plus en plus dense en dispositifs électroniques sensibles, la compatibilité électromagnétique (CEM) devient ainsi un enjeu majeur. Les normes internationales, telles que IEC 61000-6-4, imposent des limites strictes aux émissions conduites (typiquement entre 150 kHz et 30 MHz) et rayonnées, afin de garantir le bon fonctionnement des systèmes dans leur environnement électromagnétique [1, 3].

Dans ce contexte, l'étude des émissions électromagnétiques générées par un variateur de vitesse à base de NE555 revêt une importance particulière. Elle se justifie à plusieurs niveaux. Sur le plan industriel, des perturbations non maîtrisées peuvent entraîner des dysfonctionnements, des pertes de production ou des défaillances prématurées. Sur le plan réglementaire, le respect des normes CEM conditionne la commercialisation des équipements. Sur le plan scientifique et pédagogique, l'analyse des phénomènes d'EMI permet de mieux comprendre les mécanismes de génération des harmoniques MLI, d'identifier les principales sources de perturbations (transistor de puissance, câblage, alimentation, inductances parasites) et d'évaluer l'influence des paramètres de commande tels que la fréquence et le rapport cyclique. Enfin, sur le plan de l'optimisation, cette démarche contribue à améliorer la conception des circuits, leur fiabilité et leur rendement énergétique.

La problématique générale de ce travail consiste donc à caractériser et à réduire les émissions électromagnétiques générées par un variateur de vitesse à base de NE555, afin d'assurer sa conformité en matière de compatibilité électromagnétique. Plus spécifiquement, il s'agira d'analyser l'influence de la fréquence et du rapport cyclique du signal MLI sur le spectre des perturbations, d'identifier les sources principales d'EMI, de distinguer les émissions conduites des émissions rayonnées et de vérifier la conformité du système aux exigences normatives. Des solutions techniques telles que le filtrage EMI (condensateurs X/Y, filtres LC), l'ajout de réseaux snubber RC, l'optimisation du routage PCB, la mise à la masse en étoile et le blindage seront étudiées et validées expérimentalement.

L'approche adoptée repose sur une méthodologie structurée en plusieurs étapes : étude théorique des mécanismes de génération des EMI, conception et dimensionnement du

Introduction générale

variateur, simulation du comportement temporel et fréquentiel, réalisation pratique sur banc d'essai, mesures des émissions conduites et rayonnées à l'aide d'un analyseur de spectre, analyse comparative vis-à-vis des normes CEM, puis mise en œuvre et validation de solutions d'atténuation.

Ainsi, cette étude vise à proposer une démarche complète d'analyse et d'optimisation CEM appliquée à un variateur MLI simple, mettant en évidence les enjeux pratiques, réglementaires et technologiques liés à l'intégration des systèmes électroniques de puissance dans un environnement électromagnétique maîtrisé.

De ce fait le contexte de notre étude est reparti sur deux parties comme suit :

La première partie définit les bases théoriques nécessaires à la compréhension des phénomènes étudiés. Elle s'articule autour de deux chapitres :

Le premier chapitre présente la Compatibilité Électromagnétique (CEM).

Il définit les notions fondamentales liées aux perturbations électromagnétiques, leurs sources, leurs modes de propagation (mode commun et mode différentiel), ainsi que leurs effets sur les systèmes électriques et électroniques.

Ce chapitre expose également les normes et contraintes réglementaires en vigueur, ainsi que les méthodes classiques de réduction des perturbations (filtrage, blindage, mise à la terre, bonnes pratiques de câblage).

Enfin, il met en évidence les problématiques spécifiques liées aux systèmes de conversion d'énergie et aux entraînements électriques.

Le deuxième chapitre est consacré au variateur de vitesse pour moteur à courant continu (CC).

Il présente le principe de fonctionnement du moteur CC, ses équations fondamentales et les méthodes de commande de la vitesse (variation de la tension d'induit, commande par modulation de largeur d'impulsion – MLI).

Ce chapitre décrit la structure du variateur retenu, son principe de fonctionnement, ainsi que les stratégies de commande utilisées pour assurer une régulation efficace de la vitesse.

Il analyse également les perturbations électromagnétiques générées par le variateur et leur impact sur le moteur et l'environnement électrique.

La deuxième partie porte sur l'étude expérimentale. Elle est développée dans le troisième chapitre, consacré à la réalisation pratique du variateur de vitesse et à son intégration avec une machine à courant continu.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et à la mise en œuvre du dispositif expérimental. Il détaille l'architecture du montage électronique, en mettant l'accent sur la conception du circuit de commande, ainsi que l'intégration des mécanismes de protection. Une attention particulière est portée à la génération du signal de commande MLI, notamment en lien avec ses effets sur les niveaux d'émission électromagnétique.

Par ailleurs, ce chapitre traite de l'implémentation des techniques de réduction des interférences électromagnétiques, incluant notamment les stratégies de filtrage, l'optimisation du câblage et les considérations de mise à la masse, dans une optique de conformité aux exigences de la compatibilité électromagnétique (CEM).

Une campagne de mesures expérimentales est ensuite présentée, en précisant les instruments utilisés. Les grandeurs électriques et électromagnétiques mesurées telles que les courants, les tensions, ainsi que les perturbations conduites font l'objet d'une analyse détaillée, permettant de caractériser le comportement du système en régime réel.

Introduction générale

Enfin, une confrontation rigoureuse entre les résultats théoriques et expérimentaux est effectuée afin de valider le modèle proposé, d'évaluer les performances globales du système et de quantifier l'efficacité des solutions mises en œuvre en matière de réduction des émissions électromagnétiques.

Chapitre I :
***Généralités sur la compatibilité
électromagnétique (CEM)***

Introduction

Le développement rapide des systèmes électroniques et de l'électronique de puissance a conduit à une multiplication des équipements fonctionnant simultanément au sein d'un même environnement électrique. Cette coexistence croissante favorise l'apparition de perturbations électromagnétiques susceptibles d'altérer le fonctionnement normal des dispositifs électroniques et de compromettre leur fiabilité [4].

Dans ce contexte, les variateurs de vitesse occupent une place importante dans les applications industrielles et domestiques, en raison de leur capacité à assurer un contrôle précis de la vitesse des moteurs électriques. Cependant, ces systèmes constituent également une source significative d'émissions électromagnétiques. Ces dernières sont principalement générées par les commutations rapides des composants de puissance, qui engendrent des variations brusques de tension et de courant, ainsi que par les signaux de commande associés [5].

Dans le cas particulier des variateurs de vitesse commandés par des circuits intégrés tels que le NE555, la génération de signaux à modulation de largeur d'impulsion (PWM) contribue également à l'apparition de perturbations électromagnétiques, notamment en raison des fronts raides et des fréquences de commutation mises en jeu [6].

Face à ces enjeux, la compatibilité électromagnétique (CEM) constitue une exigence essentielle dans la conception et l'intégration des systèmes électroniques modernes. Elle vise à garantir le fonctionnement correct d'un équipement dans son environnement électromagnétique, sans générer de perturbations nuisibles pour les autres dispositifs, ni subir lui-même des interférences externes [7].

Cette problématique revêt une importance particulière en électronique de puissance, où les convertisseurs statiques sont à l'origine de perturbations électromagnétiques conduites et rayonnées sur une large bande de fréquences [5].

Avec la généralisation de ces systèmes dans divers domaines d'application, les contraintes normatives liées à la CEM sont devenues de plus en plus strictes, rendant indispensable la maîtrise des émissions parasites et le respect des exigences réglementaires [8].

Dans ce cadre, ce chapitre est consacré à la présentation des notions fondamentales de la compatibilité électromagnétique. Il aborde les différentes sources de perturbations, les mécanismes de couplage électromagnétique ainsi que les principales techniques permettant de limiter les interférences et d'améliorer le comportement électromagnétique des systèmes étudiés.

I.1.Définition de la CEM :

La compatibilité électromagnétique (CEM) désigne la capacité d'un équipement, d'un système ou d'une installation à fonctionner correctement dans son environnement électromagnétique, **sans générer de perturbations nuisibles pour les autres dispositifs**. Elle repose sur deux principes fondamentaux : la **limitation des émissions électromagnétiques** et une **immunité suffisante** face aux perturbations externes [7].

Étant donné que tout environnement contient un certain niveau de perturbations, chaque système doit respecter des seuils d'émission définis par les normes et être capable de tolérer ces perturbations sans dysfonctionnement. La CEM représente ainsi un compromis entre émission et immunité, garantissant la coexistence harmonieuse des équipements électroniques [7, 5].

Dans le domaine des variateurs de vitesse, notamment ceux commandés par le **NE555**, les signaux de commutation rapide peuvent générer des perturbations importantes. La prise en compte des exigences de la CEM permet alors d'assurer le bon fonctionnement et la conformité du système [7,5].

I.2.Importance de la CEM dans les systèmes électroniques :

La CEM est essentielle pour assurer la fiabilité et la sécurité des équipements électroniques. Des perturbations électromagnétiques non maîtrisées peuvent provoquer des dysfonctionnements, des pertes de données ou des comportements imprévisibles des systèmes [5].

Elle permet également de garantir la coexistence des équipements dans un même environnement et de respecter les normes internationales en vigueur, telles que celles définies par l'IEC ou le CISPR [7].

Dans le cas des variateurs de vitesse et des circuits à commutation rapide comme le NE555, le respect des exigences CEM est indispensable pour limiter les émissions et améliorer la performance globale du système [5].

I.3.Objectifs de la CEM :

- Réduire les émissions électromagnétiques générées par les équipements pour éviter toute perturbation dans leur environnement.

- Améliorer l'immunité des systèmes pour qu'ils tolèrent les perturbations externes sans dysfonctionnement.
- Assurer la conformité aux normes et réglementations internationales.
- Garantir la fiabilité et la sécurité des installations et des utilisateurs [5].

I.4.Principes fondamentaux de l'électromagnétisme :

I.4.1.Champs électriques et magnétiques :

Les phénomènes électromagnétiques reposent sur deux grandeurs fondamentales : le champ électrique et le champ magnétique, qui constituent la base de la propagation des perturbations électromagnétiques [9].

I.4.1.1Champ électrique :

Le champ électrique est une grandeur vectorielle qui représente l'influence d'une charge électrique dans l'espace. Toute charge crée un champ capable d'exercer une force sur une autre charge située à proximité.

Relation fondamentale :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (I.1)$$

$\vec{E}$: champ électrique

$\vec{F}$: force électrique

Q : charge

Ce champ est orienté du pôle positif vers le pôle négatif et s'exprime en volt par mètre (V/m). Il peut exister en absence de courant, notamment dans les phénomènes électrostatiques [10].

I.4.1.2.Champ magnétique :

Le champ magnétique est généré par le déplacement des charges électriques (courant) ou par des matériaux magnétiques. Il agit uniquement sur les charges en mouvement.

Force de Lorentz :

$$\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B} \quad (I.2)$$

$\vec{B}$: Champ magnétique

$\vec{V}$: vitesse de la charge

Le champ magnétique s'exprime en tesla (T) et ses lignes de champ sont fermées. Son sens est donné par la règle de la main droite [11].

I.4.1.3. Relation entre champ électrique et magnétique :

Les deux champs sont liés et forment ensemble les champs électromagnétiques :

- Un champ électrique variable crée un champ magnétique

- Un champ magnétique variable crée un champ électrique

I.4.1.4 Application en compatibilité électromagnétique (CEM) :

Dans les systèmes électroniques (comme les variateurs de vitesse à base de NE555), les commutations rapides génèrent des champs électriques et magnétiques variables, responsables de perturbations électromagnétiques (EMI) [5].

Ces champs peuvent être à l'origine de perturbations électromagnétiques (EMI) qui se propagent :

- Par conduction à travers les câbles.
- Par rayonnement dans l'environnement.
- Par conséquent, la maîtrise de ces champs est essentielle pour assurer la compatibilité électromagnétique, en limitant les émissions parasites et en améliorant l'immunité des systèmes.

I.4.2. Ondes électromagnétiques :

I.4.2.1. Définition :

Les ondes électromagnétiques représentent un phénomène fondamental en électromagnétisme. Elles correspondent à la propagation simultanée d'un champ électrique et d'un champ magnétique oscillants dans l'espace et dans le temps. Ces deux champs sont perpendiculaires entre eux ainsi qu'à la direction de propagation de l'onde, formant ainsi une onde transversale capable de se déplacer même dans le vide [12].

I.4.2.2. Principe de propagation :

Le champ électrique et le champ magnétique sont :

Perpendiculaires entre eux.

Perpendiculaires à la direction de propagation.

Ces champs varient dans le temps et l'espace, ce qui permet à l'onde de se propager.

Dans le vide, la vitesse est :

$$C \approx 3 \times 10^8 \text{ (m/s)} \text{ (vitesse de la lumière)} \quad (\text{I.3})$$

I.4.2.3. Caractéristiques principales :

- **Fréquence (f)** : nombre d'oscillations par seconde (Hz)
- **Longueur d'onde (λ)** : distance entre deux points identiques de l'onde (m)
- Relation fondamentale :

$$C = \lambda \times f \quad (\text{I.4})$$

- **Amplitude** : liée à l'énergie transportée
- **Phase** : position dans le cycle d'oscillation [3]

I.4.2.4. Spectre électromagnétique :

Le spectre électromagnétique regroupe l'ensemble des ondes électromagnétiques classées selon leur fréquence ou leur longueur d'onde. Il s'étend des ondes radio, utilisées dans les communications, jusqu'aux rayons gamma, en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible, l'ultraviolet et les rayons X. (Figure I.1) présente les domaines du spectre électromagnétique et leurs applications [13] .



Figure I.1 : Spectre électromagnétique et ses applications [13].

I.4.2.5. Sources des ondes électromagnétiques :

Le schéma ci-dessus illustre les principales sources des ondes électromagnétiques (Figure I.2). On distingue trois catégories :

- **Sources naturelles**, comme le soleil, qui émet un rayonnement électromagnétique sur une large gamme de fréquences.
- **Sources artificielles**, comprenant les antennes de radio et de téléphonie, ainsi que les circuits électroniques tels que le variateur NE555 étudié dans ce travail.
- **Sources industrielles**, englobant les dispositifs électriques comme les moteurs et les convertisseurs, qui génèrent des ondes lors de leur fonctionnement [14].

Cette classification permet de mieux comprendre l'origine des perturbations électromagnétiques et leur impact potentiel sur les systèmes électroniques.

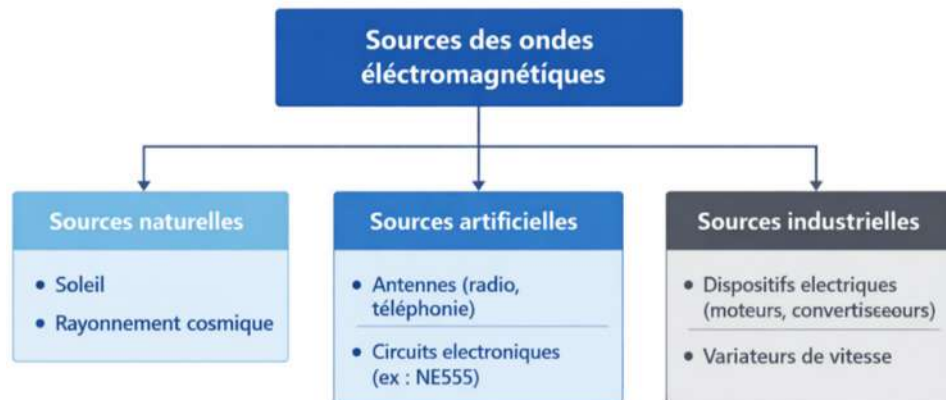


Figure I.2 : Classification des sources des ondes électromagnétiques selon leur origine naturelle, artificielle et industrielle [5].

I.4.2.6. Rôle des ondes électromagnétiques dans la CEM :

Les ondes électromagnétiques constituent le principal vecteur de propagation des perturbations électromagnétiques. Les dispositifs électroniques, notamment les variateurs de vitesse et les circuits à commutation rapide comme le NE555, peuvent générer des émissions susceptibles de perturber d'autres équipements. La maîtrise de ces émissions est donc essentielle pour assurer le fonctionnement correct des systèmes électriques et électroniques dans leur environnement [4].

Le variateur NE555 génère des commutations rapides qui produisent des ondes électromagnétiques (EMI). Ces ondes se propagent dans l'environnement et peuvent perturber le fonctionnement d'autres équipements électroniques. La maîtrise de ces émissions est essentielle pour la CEM voir la (**Figure I.3**) [4].

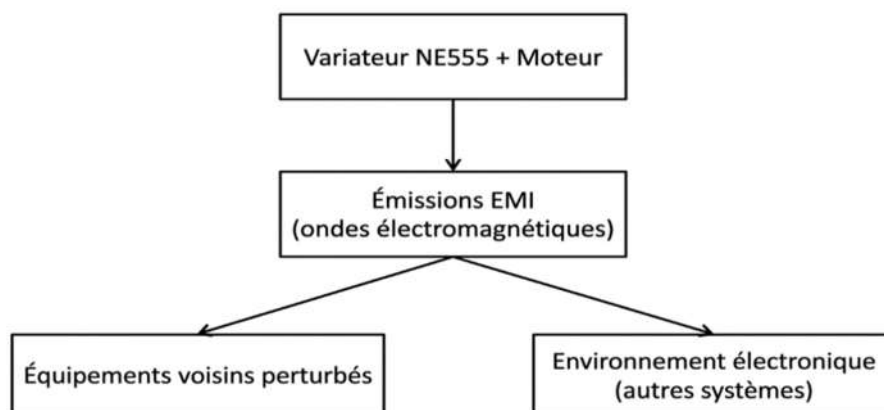


Figure I.3: Schéma de propagation des émissions électromagnétiques d'un variateur NE555 vers l'environnement [4].

I.4.3. Propagation des perturbations :

La **propagation des perturbations électromagnétiques** correspond au déplacement des signaux indésirables générés par un équipement électronique ou électrique vers son environnement. Ces perturbations peuvent affecter le fonctionnement d'autres appareils si elles ne sont pas correctement maîtrisées [4, 5].

I.4.3.1. Modes de propagation :

Propagation par conduction :

Les perturbations se propagent le long des câbles d'alimentation ou de signal connectés à l'équipement. Les lignes électriques peuvent ainsi véhiculer des signaux indésirables vers d'autres appareils, générant des interférences [4].

Propagation par rayonnement :

Les perturbations peuvent également se propager dans l'air sous forme d'ondes électromagnétiques. Les équipements électroniques à commutation rapide, comme les variateurs de vitesse basés sur le NE555, émettent des EMI qui peuvent perturber les appareils à proximité [4].

I.4.3.2. Facteurs influençant la propagation :

Plusieurs facteurs déterminent l'intensité et l'étendue des perturbations (**Figure I.4**) :

- **Fréquence des ondes** : les hautes fréquences se propagent plus facilement par rayonnement.
- **Puissance de l'émetteur** : plus la puissance est élevée, plus les perturbations sont importantes.
- **Caractéristiques des câbles et blindages** : les câbles blindés et les filtres EMI réduisent la propagation.
- **Environnement** : la présence de matériaux absorbants ou d'obstacles peut atténuer les ondes [4, 5, 15].

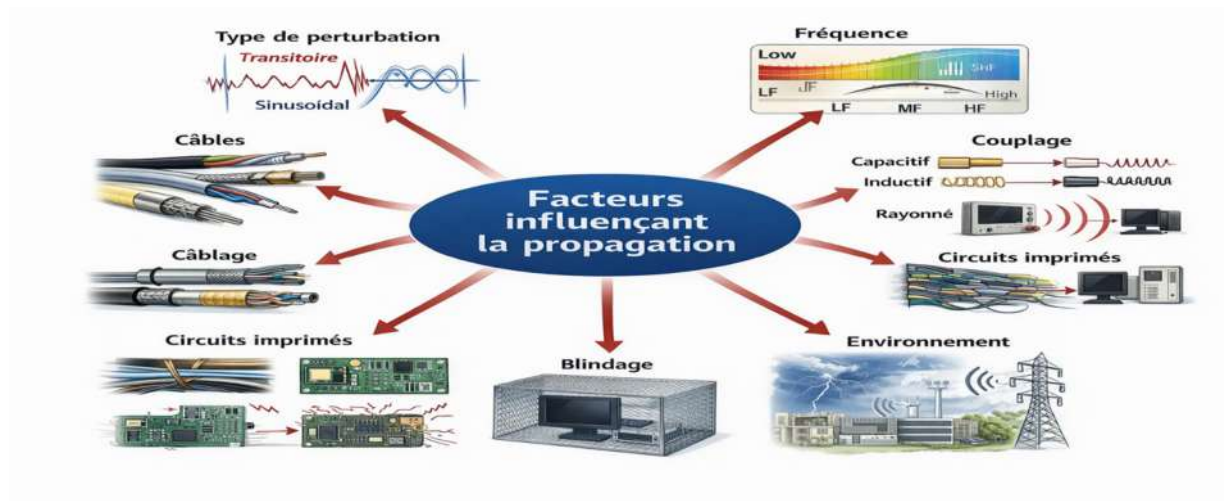


Figure I.4 : Facteurs influençant la propagation des perturbations électromagnétiques, incluant la fréquence, le type de couplage, le câblage, le blindage et l'environnement électromagnétique [4, 16].

I.4.3.3. Mesures correctives :

Pour limiter les perturbations et respecter les normes de compatibilité électromagnétique (CEM) :

- Utilisation de **filtres EMI** sur les lignes électriques.
- Blindage des circuits et câbles pour réduire le rayonnement
- Respect des **normes IEC et IEEE** concernant la tolérance aux perturbations [4, 5, 17].

I.5. Sources de perturbations électromagnétique :

Une perturbation électromagnétique est un phénomène électromagnétique susceptible d'altérer les performances d'un dispositif, d'un équipement ou d'un système. Il s'agit d'un signal non désiré, pouvant se manifester sous forme d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (H). Cette définition est conforme à la terminologie utilisée dans les normes IEC, qui décrivent une perturbation comme tout phénomène électromagnétique présent dans l'environnement électromagnétique et pouvant faire dévier un équipement de son fonctionnement prévu [18].

Il existe deux types de sources de perturbations électromagnétiques :

I.5.1. Sources naturelles :

Les perturbations électromagnétiques d'origine naturelle proviennent de phénomènes physiques indépendants de toute activité humaine (**Figure I.5**). Ces phénomènes peuvent influencer le fonctionnement des systèmes électroniques, perturber les transmissions radio et affecter certaines infrastructures sensibles [7, 10].

I.5.1.1. Le rayonnement solaire :

Constitue une source majeure de ces perturbations. En effet, le Soleil émet continuellement un large éventail d'ondes électromagnétiques. Lors d'événements intenses comme les éruptions solaires, il libère d'importantes quantités d'énergie et de particules chargées dans l'espace. Ces émissions peuvent altérer la propagation des ondes dans l'ionosphère, perturber les communications radio et impacter les satellites en orbite terrestre [19, 20].

Le rayonnement solaire correspond aux ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Lors d'éruptions solaires, des particules chargées et des rayonnements intenses atteignent la Terre et perturbent l'ionosphère, ce qui peut affecter les communications radio et les systèmes satellites voir [20, 21]

I.5.1.2. La foudre :

Est également une source significative d'interférences électromagnétiques. Elle se caractérise par des décharges électriques rapides générant des champs électromagnétiques très puissants. Ces phénomènes peuvent provoquer des surtensions dans les réseaux électriques, induire des courants parasites et perturber le fonctionnement des équipements électroniques, en particulier les plus sensibles [22, 23].

La foudre est une décharge électrique naturelle qui génère des impulsions électromagnétiques de forte amplitude et à large bande de fréquence. Ces impulsions peuvent induire des surtensions et perturber les équipements électroniques ainsi que les réseaux électriques [23].

I.5.1.3. Les tempêtes géomagnétiques :

Quant à elles, résultent de l'interaction entre le vent solaire et le champ magnétique terrestre. Elles entraînent des variations de ce champ, ce qui peut générer des courants induits dans les infrastructures électriques. Ces perturbations peuvent affecter les systèmes de navigation par satellite, comme le GPS, ainsi que les communications à longue distance, notamment dans les bandes de hautes fréquences [24].

Les tempêtes géomagnétiques sont causées par l'interaction entre le vent solaire et le champ magnétique terrestre. Elles provoquent des variations du champ magnétique et peuvent induire des courants dans les réseaux électriques, perturbant ainsi les systèmes énergétiques et les communications [24].

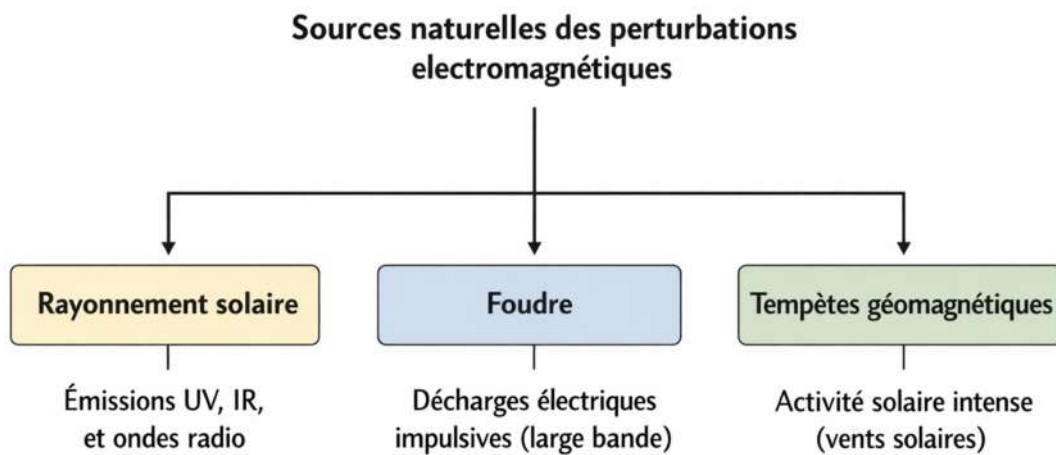


Figure I.5: Schéma illustrant les principales sources naturelles de perturbations électromagnétiques : le rayonnement solaire, la foudre et les tempêtes géomagnétiques [25].

1.5.2. Sources industrielles :

Les sources industrielles de perturbations électromagnétiques regroupent tous les équipements et installations utilisés dans les environnements industriels qui génèrent des interférences dues à leur fonctionnement électrique ou électronique (**Figure I.6**). Ces perturbations peuvent affecter les systèmes de contrôle, les capteurs, les réseaux de communication et même d'autres machines [4].

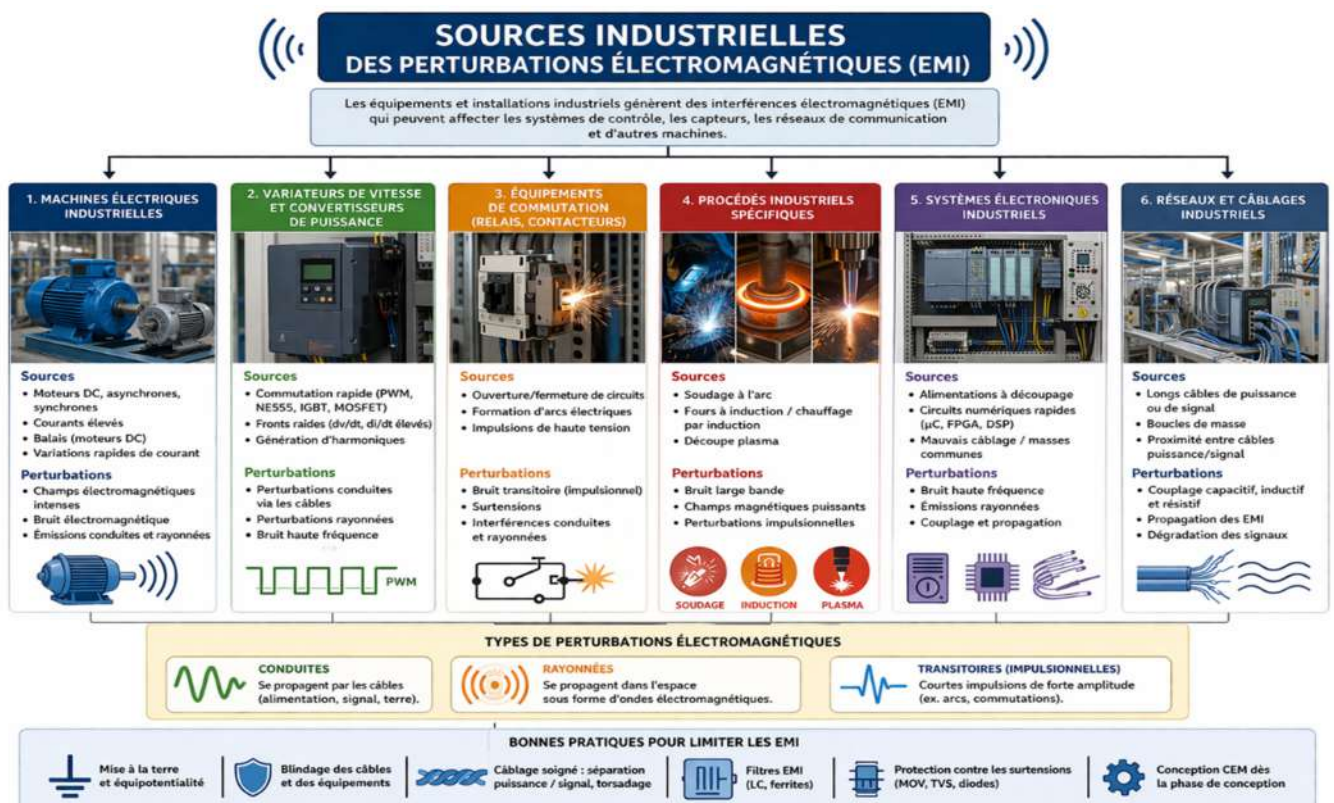


Figure I.6: Les sources industrielles de perturbations électromagnétiques [5].

Les sources industrielles d'EMI sont principalement liées :

- aux courants élevés
- aux commutations rapides
- aux phénomènes d'arc électrique

Elles sont particulièrement critiques dans les environnements industriels modernes où de nombreux équipements fonctionnent simultanément, ce qui nécessite des techniques de compatibilité électromagnétique (CEM) pour limiter les interférences [4].

I.6. Perturbations générées par l'électronique de puissance :

L'électronique de puissance constitue l'une des principales sources de perturbations électromagnétiques (EMI) dans les systèmes modernes [5, 4].

Elle regroupe les dispositifs utilisant des composants de commutation rapide tels que les transistors (MOSFET, IGBT) et les diodes pour convertir et contrôler l'énergie électrique [26].

I.6.1. Origine des perturbations :

Les perturbations sont principalement dues aux commutations rapides des composants électroniques. Lors des transitions ON/OFF, des variations brusques de tension (dv/dt) et de courant (di/dt) apparaissent, générant des champs électromagnétiques parasites [27].

Ces phénomènes entraînent :

Des émissions conduites via les câbles d'alimentation.

Des émissions rayonnées dans l'environnement proche.

Des surtensions et oscillations parasites dans les circuits.

Par exemple, un variateur de vitesse basé sur un signal MLI (comme avec NE555) génère des harmoniques à haute fréquence, responsables de perturbations importantes [26, 28].

I.6.2. Types de perturbations :

I.6.2.1. Perturbations conduites :

Les perturbations par conduction se manifestent principalement sous forme de courants parasites circulant dans les câbles et de tensions induites aux bornes des circuits électroniques. L'intensité de ces perturbations dépend fortement de la rapidité des variations du courant et de la tension (di/dt et dv/dt), qui augmentent le niveau des interférences [5].

Ces courants et tensions parasites, en circulant dans les conducteurs reliant différents équipements, peuvent à leur tour générer des émissions électromagnétiques rayonnées. Inversement, les champs électromagnétiques rayonnés peuvent induire des perturbations dans les circuits via les interconnexions [5].

Ainsi, les perturbations conduites et rayonnées ne sont pas indépendantes, mais étroitement liées et interconnectées, formant un phénomène global de propagation des interférences électromagnétiques [4].

I.6.2.2. Perturbations rayonnées :

Les perturbations rayonnées proviennent des champs électromagnétiques générés par les circuits électriques lorsqu'ils sont soumis à une différence de potentiel et traversés par des courants. L'intensité de ces champs dépend de plusieurs facteurs, notamment la fréquence, la nature du signal et la distance par rapport à la source [4, 5].

À basses fréquences, le champ magnétique est généralement dominant, surtout à proximité immédiate des équipements, où il peut être de nature continue ou impulsionnelle. En revanche, à hautes fréquences, les perturbations deviennent plus critiques, notamment en régime transitoire, avec des effets plus étendus [5, 29].

Le champ électrique, exprimé en volts par mètre (V/m), est principalement généré par des circuits à haute impédance soumis à des tensions élevées. Le champ magnétique, quant à lui, exprimé en ampères par mètre (A/m), est produit par des circuits à faible impédance parcourus par des courants importants [4, 29].

I.6.2.3. Bruit électromagnétique :

Le bruit électromagnétique, ou interférence électromagnétique (EMI), désigne tout signal indésirable perturbant les signaux utiles dans un système électrique ou électronique. Il peut provoquer des erreurs de transmission, des dysfonctionnements ou endommager les équipements. On distingue deux types principaux : le **bruit conduit**, transmis par les câbles ou circuits et généré par des variations rapides de courant ou de tension (par exemple, moteurs ou convertisseurs de puissance), et le **bruit rayonné**, émis dans l'espace sous forme de champs électromagnétiques, dont l'intensité dépend de la fréquence, de la distance et de la source, pouvant affecter les communications radio et systèmes haute fréquence (**Figure I.7**). Les sources de EMI peuvent être **naturelles** (foudre, rayonnement solaire, tempêtes géomagnétiques) ou **artificielles** (électronique de puissance, ordinateurs, lignes haute tension, moteurs électriques), entraînant des perturbations des signaux sensibles et une dégradation des performances des équipements [4, 5].

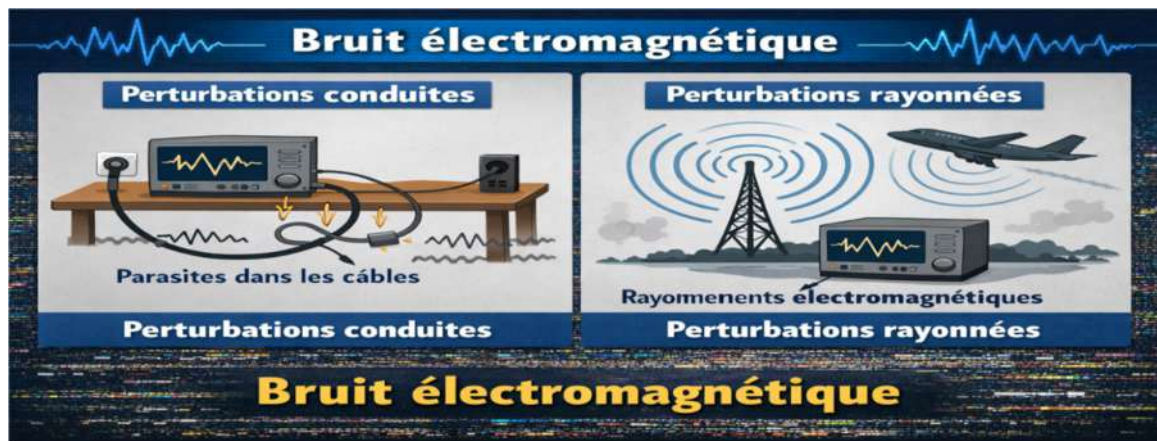


Figure I.7: Représentation du bruit électromagnétique et de ses deux types principaux [6].

I.7.Mécanismes de couplage électromagnétique :

Le couplage électromagnétique est un phénomène par lequel un champ électromagnétique produit par un circuit induit une tension ou une charge dans un autre circuit sans contact direct, souvent par effet inductif. Il nécessite une variation du champ électromagnétique et repose sur la loi de Faraday (1831) [4].

Ce couplage peut être de deux types : électrique et magnétique. Le couplage électrique apparaît lorsque des variations de charge dans un conducteur influencent un conducteur voisin [4, 5].

Les couplages sont les modes d'action des perturbations «CEM» sur les victimes (**Figure I.8**)

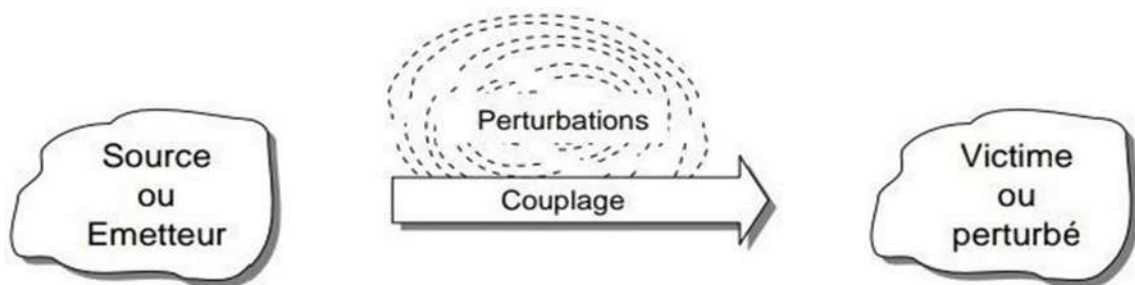


Figure I.8: Transmission des perturbations entre la source et l'équipement victime [30].

I.7.1.Couplage capacitif :

I.7.1.1.Définition :

Le perturbateur et l'équipement victime sont couplés par un champ magnétique, ce qui caractérise le couplage inductif. Le niveau de perturbation dépend principalement de la variation du courant dans le circuit perturbateur (di/dt) ainsi que de la valeur de l'inductance mutuelle de couplage entre les deux circuits [4, 5].

Ce type de couplage augmente avec la fréquence du signal, la proximité entre le perturbateur et la victime, ainsi que la longueur des câbles disposés en parallèle **figure I.9**.

Il est également influencé par la hauteur des câbles par rapport à un plan de masse et par l'impédance de charge du circuit perturbateur, qui peut amplifier les effets de la perturbation [5].

V_s DM : Source de tension perturbatrice (mode différentiel).

I_v DM : Courant perturbateur coté victime (mode différentiel).

V_s CM : Source de tension perturbatrice (mode commun).

I_v CM : Courant perturbateur coté victime (mode commun).

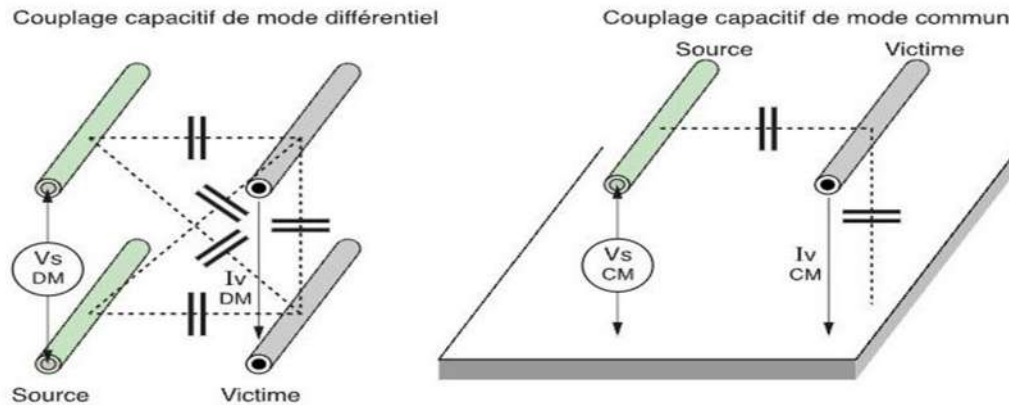


Figure I.9: Exemple de couplage capacitif [31].

I.7.1.2. Mesures

correctives :

Pour limiter le couplage capacitif, plusieurs mesures correctives peuvent être mises en œuvre simultanément :

- Réduire au strict minimum la longueur des sections parallèles entre le perturbateur et la victime.
- Augmenter l'écartement entre les câbles perturbateurs et victimes.
- Fixer les câbles contre des structures métalliques reliées à la terre.
- Dans le cas d'une liaison bifilaire, rapprocher le fil allé du fil retour.
- Placer un fil de protection mis à la masse aux deux extrémités et le répartir régulièrement entre le perturbateur et la victime.
- Utiliser des câbles groupés en paires ou en quarts plutôt que des conducteurs isolés.
- Employer des systèmes de transmission symétriques sur un câblage correctement adapté.
- Installer un blindage sur les câbles perturbateurs, les câbles victimes, ou les deux, en veillant à relier le blindage à la masse (Figure I.10).
- Réduire le dv/dt des perturbateurs en augmentant le temps de montée des signaux lorsque cela est possible [5, 25].

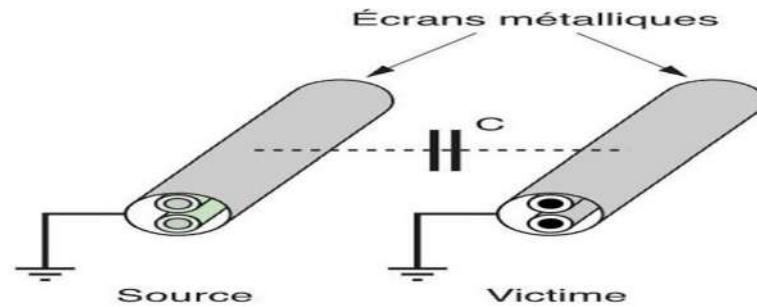


Figure I.10: Les câbles blindés ou avec écran minimisent le couplage capacitif [31].

I.7.2. Couplage inductif :

I.7.2.1. Définition :

Le perturbateur et la victime sont reliés par un champ magnétique, et l'intensité de la perturbation dépend à la fois des variations de courant (di/dt) et de la valeur de l'inductance mutuelle qui les relie. Le couplage inductif tend à augmenter avec la fréquence du signal, la proximité entre le perturbateur et la victime ainsi que la longueur des câbles disposés en parallèle, la hauteur des câbles par rapport au plan de masse, ainsi que l'impédance de charge du circuit perturbateur (**Figure I.11**) [4, 5].

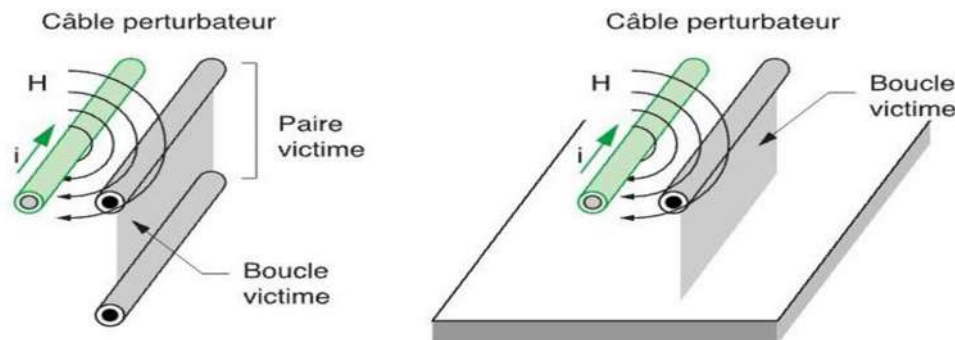


Figure I.11: Exemple de couplage inductif [32].

I.7.2.2. Mesures correctives :

Pour réduire les effets du couplage inductif comme du couplage capacitif, plusieurs mesures correctives peuvent être mises en œuvre simultanément :

- Limiter au strict minimum les longueurs de câbles parallèles entre perturbateur et victime.
- Accroître la distance entre perturbateur et victime.
- Fixer les câbles sur des structures métalliques mises à la terre.
- Utiliser des paires torsadées.
- Rapprocher les fils allé et retour dans le cas d'une liaison bifilaire.

- Privilégier des câbles multiconducteurs ou des conducteurs uniques disposés en trèfle.
- Installer un fil d'accompagnement relié à la terre aux deux extrémités et à intervalles réguliers entre perturbateur et victime.
- Employer des systèmes de transmission symétriques sur un câblage correctement adapté.
- Mettre en place un blindage sur les câbles perturbateurs, les câbles victimes, ou les deux, avec connexion à la terre.
- Réduire la variation de courant (di/dt) du perturbateur en augmentant le temps de montée du signal lorsque cela est possible, par exemple via des résistances ou des composants thermistances (CTP) en série, ou encore l'utilisation de ferrites sur les câbles perturbateurs et/ou victimes [4, 25].

I.7.3. Couplage par rayonnement :

I.7.3.1. Définition :

Le perturbateur et la victime interagissent à travers un milieu de propagation, tel que l'air. L'intensité de la perturbation dépend de la puissance de la source émettrice ainsi que de l'efficacité des antennes d'émission et de réception. Un champ électromagnétique se compose simultanément d'un champ électrique et d'un champ magnétique, étroitement corrélés [5, 33]. On peut analyser séparément les composantes électrique et magnétique (**Figure I.12**).

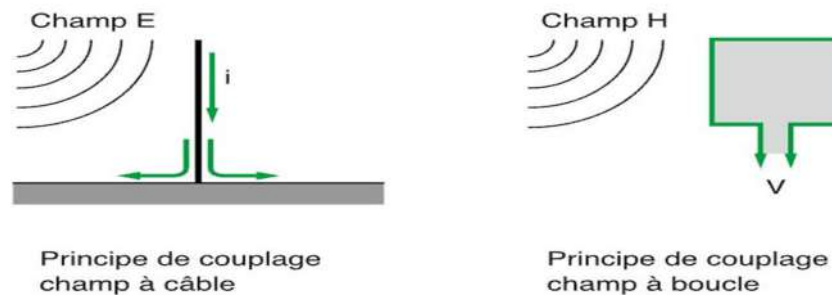


Figure I.12: Exemple de couplage par rayonnement [10].

Le champ électrique (E) et le champ magnétique (H) interagissent avec les systèmes de câblage via les fils et les boucles. Lorsqu'un câble est exposé à un champ électrique variable, un courant y est induit : c'est ce qu'on appelle le **couplage champ-à-câble**. De manière similaire, lorsqu'un champ magnétique variable traverse une boucle, il génère une force contre-électromotrice qui induit une tension aux extrémités de la boucle, phénomène désigné sous le terme de **couplage champ-à-boucle** (**Figure I.13**).

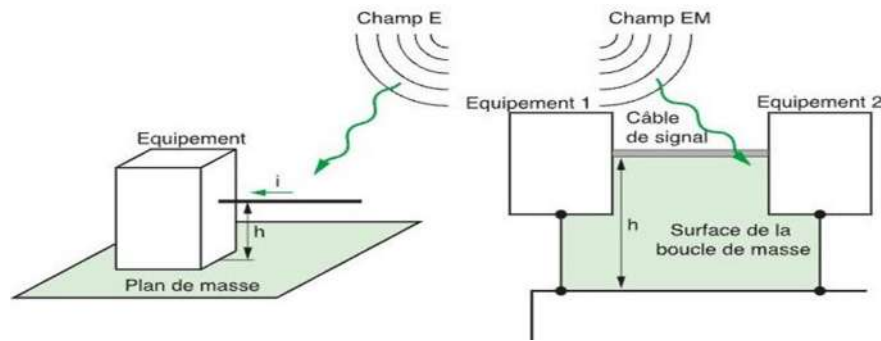


Figure I.13: Exemple de couplage par rayonnement [34].

I.7.3.2. Mesures correctives :

I.7.3.2.1. Couplage champ à câble

- Réduire l'effet d'antenne de la victime en diminuant la hauteur du câble par rapport au plan de masse.
- Installer le câble dans un conduit métallique continu et relié à la masse (tuyau, goulotte, chemin de câble).
- Utiliser des câbles blindés correctement mis en œuvre et mis à la masse.
- Ajouter des conducteurs de masse accompagnant le câble.
- Installer des filtres ou des ferrites sur le câble victime [4, 5, 35].

I.7.3.2.2. Couplage champ à boucle

- Réduire la surface de la boucle en diminuant la hauteur et la longueur du câble.
- Appliquer les mêmes solutions que pour le couplage champ à câble.
- Utiliser le principe de la cage de Faraday pour protéger les boucles sensibles [4, 36].

I.7.4. Couplage par conduction :

I.7.4.1. Définition :

Les perturbations conduites désignent des interférences électromagnétiques se propageant via des conducteurs électriques (**Figure I.14**). Leur transmission s'effectue à travers différents supports, notamment les lignes d'alimentation, les câbles de contrôle et de communication, les conducteurs de masse (PE, PEN), la terre, ainsi que par l'intermédiaire des capacités parasites [4].

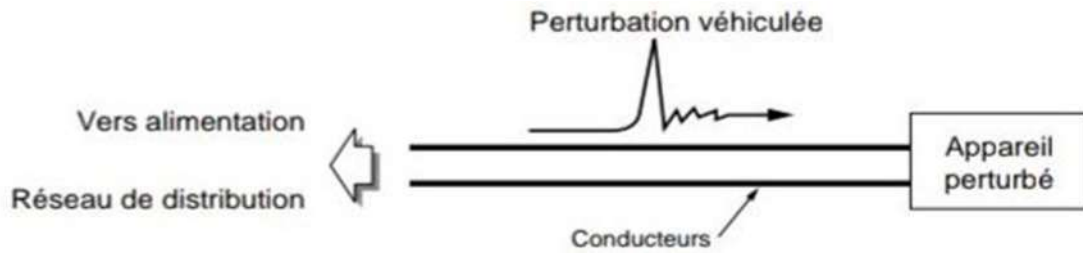


Figure I.14: Couplage par conduction [37].

Dans une liaison bifilaire (à deux conducteurs), un signal, qu'il soit utile ou parasite, peut se propager selon deux modes distincts :

- le mode différentiel
- le mode commun.

I.7.4.2. Le mode différentiel :

Le courant en mode différentiel (également appelé mode série) circule dans un conducteur, traverse l'équipement en pouvant provoquer ou non des perturbations de fonctionnement, puis revient par un second conducteur (**Figure I.15**) [4, 38].

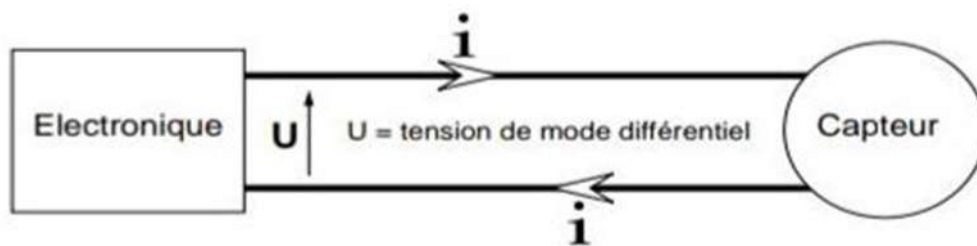


Figure I.15: Mode différentiel [4].

I.7.4.3. Le mode commun :

Le courant en mode commun circule simultanément dans tous les conducteurs dans la même direction et retourne vers la masse via les capacités parasites (**Figure I.16**).

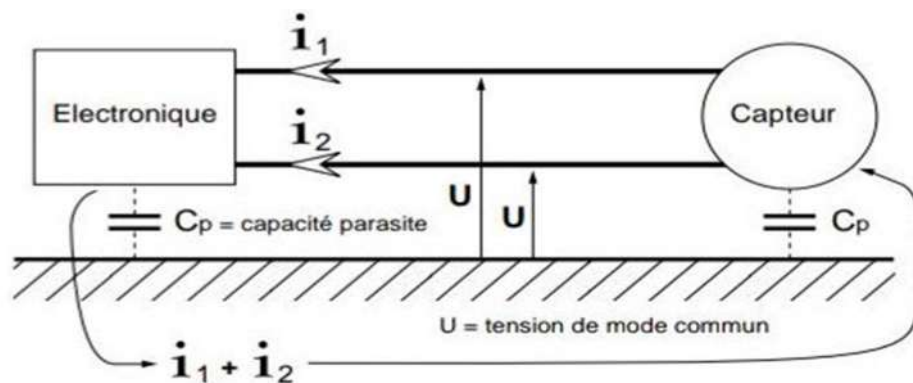


Figure I.16: Le mode commun [5].

Les perturbations en mode commun constituent le principal problème en compatibilité électromagnétique (CEM), car leur chemin de propagation est souvent difficile à déterminer [4, 38].

I.7.4.4. Mesures correctives :

- **Câblage** : réduire les longueurs parallèles, séparer les câbles perturbateurs et sensibles, rapprocher les conducteurs aller-retour.
- **Blindage et mise à la terre** : utiliser des câbles blindés correctement mis à la masse, conduits métalliques, plaquer les câbles sur des structures mises à la terre.
- **Filtres et composants** : filtres LC ou ferrites pour atténuer les perturbations haute fréquence et les courants de mode commun.
- **Organisation** : séparer circuits numériques et analogiques, éviter les chemins communs et planifier les routes de câbles pour limiter les couplages [4, 39].

I.8. Compatibilité électromagnétique dans les variateurs de vitesse :

La compatibilité électromagnétique (CEM) des variateurs de vitesse porte sur la maîtrise des perturbations générées par les commutations rapides de l'électronique de puissance. L'objectif est d'assurer que le variateur fonctionne de manière fiable sans perturber les autres équipements électriques présents sur le site. Les enjeux principaux de la CEM incluent la réduction des émissions conduites et rayonnées, ainsi que l'augmentation de l'immunité du variateur face aux perturbations existantes dans l'environnement industriel [5, 40].

Pour garantir une bonne compatibilité électromagnétique (CEM), plusieurs mesures essentielles doivent être mises en œuvre :

- Intégration de filtres CEM à l'entrée du variateur, permettant de réduire les perturbations conduites et d'atténuer les interférences propagées par le réseau d'alimentation.
- Mise à la terre de qualité, assurée par des liaisons courtes, larges et de faible impédance, afin de garantir une évacuation efficace des courants parasites et de limiter les différences de potentiel.
- Blindage adapté des câbles, notamment ceux du moteur et des circuits de commande, afin de réduire les émissions rayonnées et d'améliorer la résistance aux perturbations externes.
- Respect des normes applicables, telles que la norme IEC/EN 61800-3, qui définit les limites d'émission électromagnétique ainsi que les exigences d'immunité pour les systèmes d'entraînement à vitesse variable [41].

Un variateur de vitesse peut en effet générer des interférences conduites et rayonnées du fait des commutations MLI (modulation de largeur d'impulsion) à haute fréquence dans l'onduleur. Ces perturbations peuvent provoquer des dysfonctionnements ou une réduction de la fiabilité d'autres équipements alimentés sur le même réseau ou situés à proximité. Les normes CEM ont pour but de limiter ces émissions à des niveaux acceptables et d'assurer que le variateur reste opérationnel dans un environnement industriel souvent fortement perturbé par d'autres sources électromagnétiques [5, 40].

I.8.1.Sources d'émissions électromagnétique dans les variateurs de vitesse :

Les variateurs de vitesse génèrent des perturbations électromagnétiques (EMI) principalement à cause de la commutation rapide de leurs composants électroniques, tels que les IGBT ou les MOSFET.

Les principales sources de ces perturbations sont :

- **Onduleur (IGBT/MOSFET) :** C'est la source principale. Les commutations rapides produisent des signaux haute fréquence (bruit HF) qui peuvent se propager dans l'air ou dans les câbles.
- **Redresseur d'entrée :** Il convertit le courant alternatif (CA) en courant continu (CC) et génère des distorsions harmoniques sur le réseau d'alimentation, notamment aux rangs 5, 7, 11, etc.
- **Câbles moteur :** Ils se comportent comme des antennes, rayonnant les interférences hautes fréquence issues de l'onduleur.
- **Bus CC (liaison CC) :** Peut provoquer des courants de mode commun, sources supplémentaires de perturbations.

Pour limiter ces émissions électromagnétiques, il est recommandé d'utiliser des filtres adaptés, de blindés les câbles et d'assurer une mise à la terre correcte [4].

I.8.2.Influence de la commutation rapide :

Avec l'évolution des systèmes fonctionnant à haute vitesse, les communications rapides contribuent fortement à l'amélioration des performances, tout en engendrant de nouveaux défis liés aux perturbations, aux risques et à la fiabilité. **Le tableau I.1** ci-dessous propose une analyse de ces impacts dans différents domaines.

Tableau I.1: Impact des communications rapides sur les performances, les risques et les solutions dans domaines technologiques.

Domaine	Avantages	Inconvénients	Risques	Solutions
Électronique de puissance (Convertisseurs)	Réduction de la taille des filtres, condensateurs et inductances ; diminution du volume et du poids des convertisseurs	Taux de variation élevé du courant/tension entraînant des EMI conduites et rayonnées	Surtensions pouvant endommager les composants non protégés	Techniques de commutation douce (soft switching) ; protections contre les surtensions
Réseaux et télécommunications	Réduction de la latence ; routage plus efficace des paquets ; meilleure performance des LAN	Charge accrue sur le réseau lors de pics de trafic	Perturbations possibles sur les équipements sensibles	Optimisation des caches de routage ; gestion du flux de paquets
Sécurité et maintenance	—	—	Risque accru d'arcs électriques sous forte charge	Maintenance préventive des appareillages de coupure ; mise en œuvre de dispositifs de protection

I.9. Normes et réglementations CEM :

Les normes et réglementations en compatibilité électromagnétique (CEM) visent à garantir le bon fonctionnement des équipements électriques et électroniques dans leur environnement, sans qu'ils produisent ou subissent de perturbations électromagnétiques. Elles fixent des limites d'émission et des seuils d'immunité pour assurer une coexistence harmonieuse entre les systèmes. Établies par des organismes internationaux et régionaux, ces exigences sont essentielles pour la conformité des équipements, la sécurité des installations et la fiabilité des performances, particulièrement dans des applications critiques comme les variateurs de vitesse [42].

I.9.1. Normes internationales :

Les normes internationales en compatibilité électromagnétique (CEM) sont mises en place pour uniformiser les exigences techniques à l'échelle mondiale et garantir le bon fonctionnement des équipements électriques dans différents environnements. Elles précisent notamment les méthodes de test, les seuils d'émission autorisés ainsi que les niveaux de résistance aux perturbations électromagnétiques [43].

Plusieurs organismes jouent un rôle clé dans l'élaboration de ces normes :

- **IEC (International Electrotechnical Commission) :**
Cet organisme développe des normes générales et spécifiques, en particulier la série **IEC 61000**, largement utilisée pour les essais d'émission et d'immunité.
- **CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) :**
Il est chargé de définir les limites des émissions électromagnétiques, avec des normes telles que **CISPR 11** pour les équipements industriels et **CISPR 32** pour les équipements multimédias.
- **ISO (Organisation Internationale de Normalisation) :**
Elle intervient principalement dans certains secteurs spécifiques, notamment l'automobile, avec des normes comme **ISO 7637** qui traite des perturbations électriques dans les véhicules.

Dans l'ensemble, ces normes contribuent à assurer la compatibilité entre les différents équipements, à réduire les interférences et à faciliter leur mise sur le marché à l'échelle internationale [43, 44].

I.9.2. Limites d'émission électromagnétique :

Les limites d'émission électromagnétique désignent les niveaux maximums de perturbations qu'un dispositif électrique ou électronique peut produire sans risquer de perturber son environnement. Elles sont établies par des normes afin d'assurer la coexistence correcte des différents équipements [43].

On distingue principalement deux catégories d'émissions :

- **Les émissions conduites :** elles se propagent le long des câbles d'alimentation ou de communication, généralement dans une bande de fréquences comprise entre 150 kHz et 30 MHz.
- **Les émissions rayonnées :** elles se diffusent dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques, sur des fréquences allant de 30 MHz à plusieurs GHz.

Ces normes imposent des seuils à ne pas dépasser, souvent exprimés en dB μ V, et mesurés selon des méthodes normalisées avec des instruments adaptés.

Parmi les principales références normatives, on peut citer :

- **CISPR 11 / EN 55011 :** applicable aux équipements industriels, scientifiques et médicaux
- **CISPR 22 / EN 55032 :** dédiée aux équipements multimédias
- **CISPR 14 :** concernant les appareils électroménagers

Le respect de ces exigences est indispensable pour garantir la compatibilité électromagnétique (CEM), éviter les interférences entre équipements et répondre aux réglementations en vigueur.

I.10.Méthodes de réduction des interférences :

La diminution des interférences électromagnétiques (IEM) et radiofréquences repose essentiellement sur plusieurs techniques complémentaires. Parmi les plus importantes figurent le **blindage** (comme les cages de Faraday ou les câbles blindés), la **mise à la terre**, qui permet d'évacuer les courants parasites, ainsi que le **filtrage** des signaux indésirables à l'aide de filtres adaptés. [42, 43]

Par ailleurs, la séparation physique des équipements et l'éloignement des sources de perturbation jouent également un rôle essentiel.

Voici les principales méthodes utilisées :

I.10.1.Blindage électromagnétique :

Emploi de matériaux conducteurs (cuivre, aluminium ou acier) pour entourer les dispositifs sensibles, limitant ainsi la propagation des champs électromagnétiques (**Figure I.17**) [42, 43].

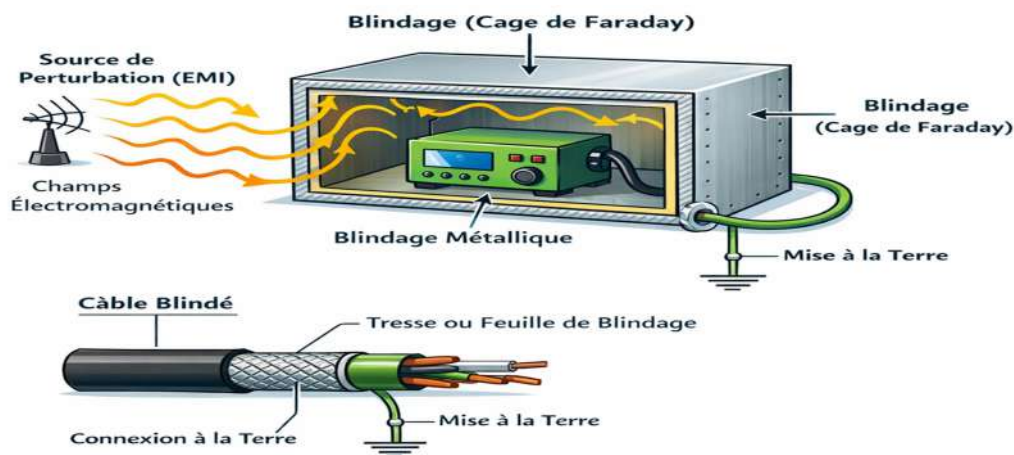


Figure I.17: Schéma illustratif du blindage électromagnétique (cage de Faraday et câbles blindés) [45].

I.10.2.Câbles blindés :

Utilisation de conducteurs protégés par une gaine métallique ou une feuille conductrice afin de réduire l'influence des perturbations extérieures voir la (**Figure I.18**) [42, 43].

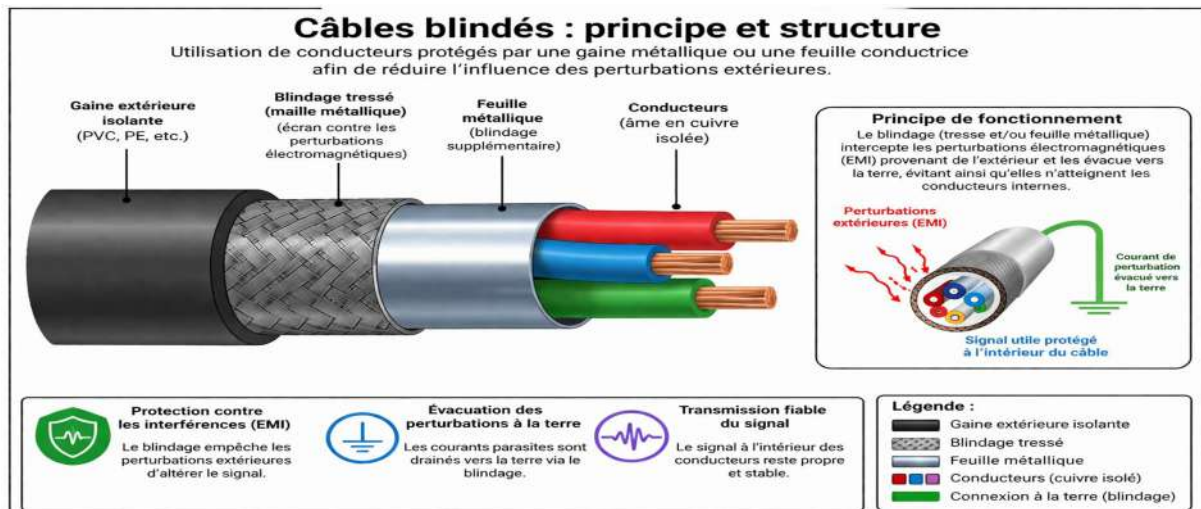


Figure I.18: Câbles blindés, principe et structure et protection contre les interférences électromagnétiques [46].

I.10.3. Mise à la terre (MALT) :

Création d'un chemin à faible résistance destiné à diriger les courants indésirables vers la terre, ce qui est particulièrement utile pour atténuer les perturbations de basse fréquence (Figure I.19) [42, 44]

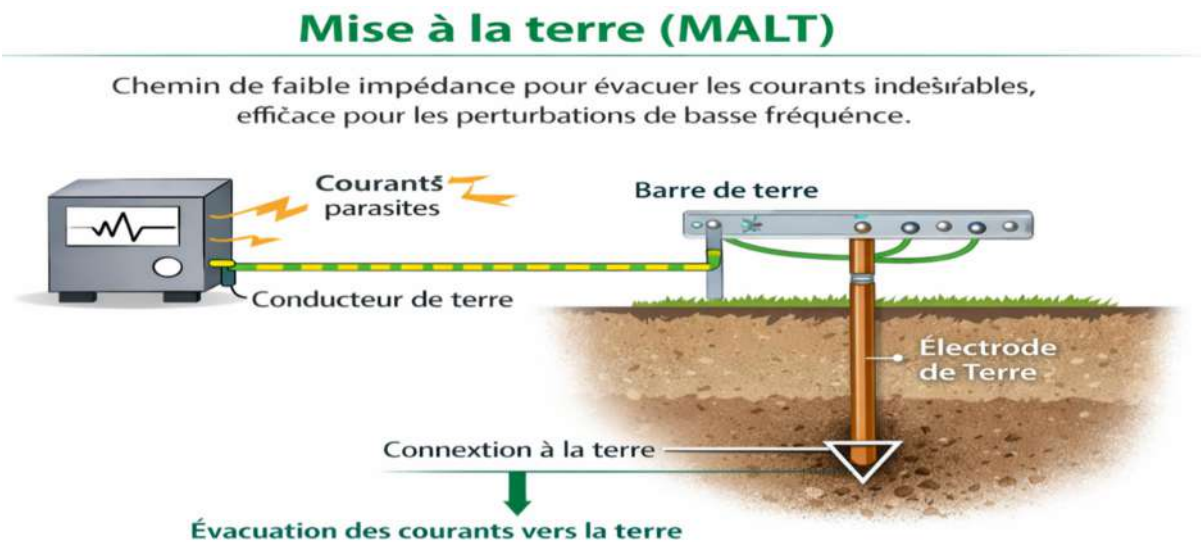


Figure I.19: Mise à la terre (MALT) [47].

I.10.4. Filtrage :

Le filtrage est une technique essentielle pour réduire les perturbations conduites dans les systèmes électriques, en particulier dans les variateurs de vitesse. Il permet de limiter la propagation des signaux parasites à haute fréquence vers le réseau ou les équipements sensibles (Figure I.20) [42, 44].

Un filtre CEM fonctionne comme un sélecteur de fréquence : il laisse passer les signaux utiles (basse fréquence) et atténue les perturbations liées aux commutations rapides. Il est généralement installé à l'entrée ou à la sortie du variateur [44]

Les principaux types de filtres sont :

- **Filtre LC** : réduit les hautes fréquences grâce à une inductance et un condensateur
- **Filtre RC** : atténue les surtensions et les oscillations
- **Filtres CEM industriels** : combinent plusieurs composants pour une meilleure efficacité

Ces filtres agissent sur :

- **le mode différentiel** (entre phase et neutre)
- **le mode commun** (entre conducteurs et terre)

Les filtres modernes permettent de traiter simultanément ces deux types de perturbations.

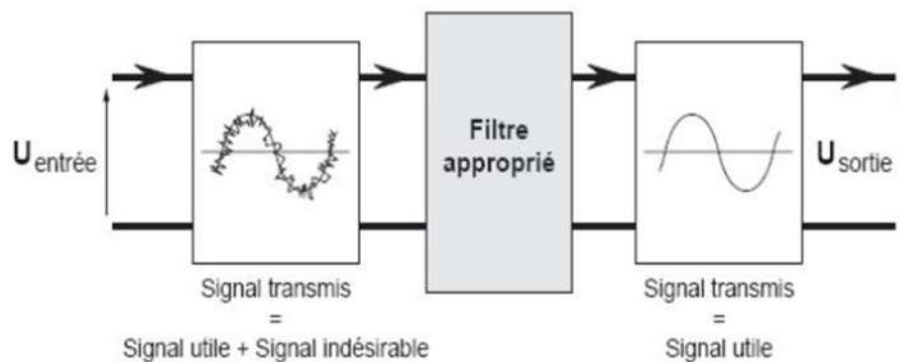


Figure I.20 : Filtrage des perturbations [48].

Conclusion :

La compatibilité électromagnétique (CEM) représente un aspect essentiel dans la conception et l'exploitation des systèmes électriques et électroniques contemporains. Elle a pour objectif d'assurer le fonctionnement correct des équipements dans leur environnement électromagnétique, tout en réduisant les perturbations qu'ils peuvent émettre et susceptibles d'affecter d'autres dispositifs.

Cette étude a mis en évidence que les perturbations électromagnétiques peuvent se transmettre selon plusieurs modes de couplage, notamment par conduction, couplage capacitif, inductif et par rayonnement. Ces phénomènes sont particulièrement marqués dans les systèmes faisant

appel à l'électronique de puissance, tels que les variateurs de vitesse, en raison des commutations rapides des composants semi-conducteurs.

La maîtrise de la CEM nécessite ainsi une approche globale reposant sur plusieurs éléments complémentaires : une conception optimisée des circuits et des câblages, l'intégration de solutions de filtrage et de blindage, la mise en œuvre d'une mise à la terre efficace, ainsi que le respect des normes et réglementations en vigueur.

Une gestion adéquate de la CEM contribue non seulement à améliorer la fiabilité et la sécurité des installations, mais également à garantir la conformité des équipements aux exigences réglementaires. Elle constitue désormais un critère fondamental dans tout projet industriel ou électronique. Le chapitre suivant sera consacré aux différents variateurs de vitesse MLI et leurs impacts sur l'environnement électrique vis-à-vis de la CEM.

Chapitre II :
Variateur MLI et
problématique CEM

Introduction :

Le contrôle de la vitesse des moteurs à courant continu (CC) est un élément essentiel dans de nombreuses applications industrielles et technologiques. Grâce à leur structure, ces moteurs permettent un réglage simple et précis de la vitesse par des moyens électriques, sans nécessiter d'interventions mécaniques. Un bon contrôle de la vitesse contribue à améliorer les performances des systèmes, à réduire l'usure des composants et à optimiser la consommation d'énergie [49, 50].

Dans ce contexte, l'utilisation d'un variateur de vitesse s'impose comme une solution efficace pour adapter le fonctionnement du moteur aux exigences du système. En effet, le variateur permet de réguler la vitesse et le couple en fonction des besoins, assurant ainsi un fonctionnement stable, précis et fiable. Cette régulation permet également de limiter les surcharges et d'augmenter la durée de vie du moteur [50, 51].

Les variateurs de vitesse pour moteurs à courant continu offrent une grande précision de commande, notamment à basse vitesse. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour assurer cette régulation, parmi lesquelles la variation de la tension d'alimentation et la modulation de largeur d'impulsion (MLI), largement utilisée en électronique moderne. Ces techniques permettent d'obtenir un démarrage progressif ainsi qu'un contrôle efficace de l'accélération et de la décélération, réduisant ainsi les contraintes mécaniques [52, 53].

De plus, les moteurs à courant continu commandés par variateur présentent des avantages importants, tels qu'un couple de démarrage élevé et une bonne stabilité de fonctionnement. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptés à des domaines comme l'automatisation industrielle, la robotique, les convoyeurs et les machines-outils, où un contrôle précis de la vitesse est indispensable [49].

Ce chapitre est consacré à l'étude du variateur de vitesse pour moteur à courant continu (MCC) avec un accent particulier sur le contrôle électronique via le circuit intégré NE555. Il vise à présenter les principes fondamentaux du fonctionnement du moteur et les méthodes de régulation de sa vitesse, ainsi qu'à décrire la conception et la mise en œuvre pratique du variateur, par ailleurs ce chapitre prépare l'analyse expérimentale des émissions électromagnétiques générées permettant d'évaluer leur impact sur l'environnement et optimiser les performances du moteur dans des conditions opérationnelles spécifiques.

II.1.Généralités sur le moteur à courant continu :**II.1.1.Définition Moteur courant continu :**

Le moteur à courant continu est constructivement destiné à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique (**figure II.1**). Il est très utilisé dans les Machines à outils tapis convoyeur chaîne de montage ect..... [54].



Figure II.1 : Convertisseur de l'énergie dans un moteur à courant continu [55].

II.1.2. Description d'un moteur à courant continu :

Un moteur à courant continu est une machine électrique qui agit comme un convertisseur électromagnétique permettant de transformer l'énergie électrique provenant d'une source de courant continu en énergie mécanique de rotation [56].

Ce type de moteur est principalement constitué de deux parties essentielles :

- **Le stator :** parties fixes du moteur qui génèrent un champ magnétique. Ce champ peut être produit soit par des aimants permanents. Situés généralement à l'arrière du stator, assurent le contact électrique avec le rotor.
- **Le rotor (induit) :** partie mobile du moteur composée d'enroulements reliés à un collecteur qui permet d'inverser la polarité du courant dans les bobines du rotor à chaque rotation. Ce qui crée un champ magnétique variable interagissant avec celui du stator et provoquant ainsi la rotation du moteur. La Figure II.2 illustre la constitution d'un moteur à courant continu.

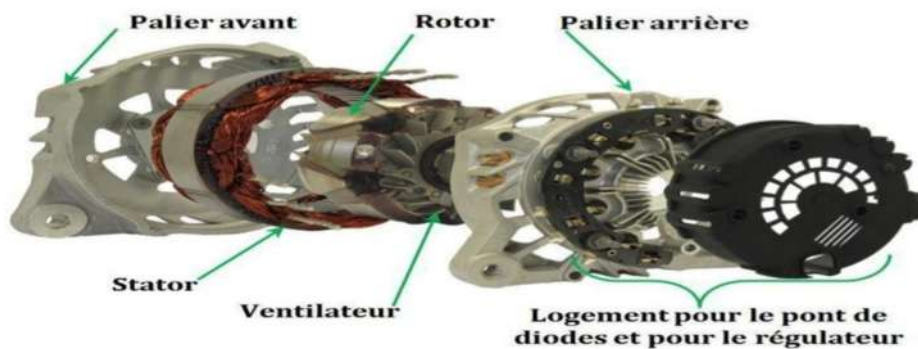


Figure II.2 : Schéma de constitution d'un moteur à courant continu [57].

II.1.3 Caractéristiques générales d'un moteur à courant continu :

Les moteurs à courant continu sont particulièrement appréciés dans les systèmes nécessitant un contrôle précis de la vitesse et du couple. Ils offrent un couple élevé dès le démarrage et permettent une régulation aisée de la vitesse, soit en ajustant la tension d'alimentation, soit en modifiant le flux magnétique. Un rotor induit parcouru par le courant, ainsi que des balais collecteurs assurant la commutation, selon le type d'excitation, série, shunt ou composée, les performances varient en termes de couple et de stabilité de la vitesse malgré leur rendement élevé et leur réactivité rapide aux variations de charge. Un entretien régulier des balais et du collecteur reste indispensable pour garantir une longue durée de fonctionnement [58].

II.1.4. Modélisation d'un moteur à courant continu :

La modélisation d'un moteur à courant continu (MCC) à aimant permanent ou à excitation indépendante repose sur deux piliers : la partie électrique et la partie mécanique, reliées par des constantes de couplage **Figure II.3** [59].

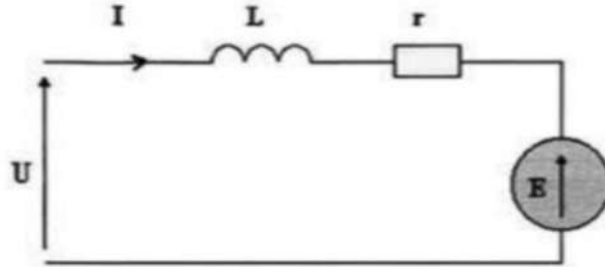


Figure II.3 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu [60].

Un moteur électrique à courant continu est régi par équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécanique et magnétique.

D'après la loi de newton ,combiné à la loi de kirchhoff on peu écrire équations différentielles de premiers ordres suivants :

$$U(t) = Ri(t) + Li \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.1})$$

$$e(t) = Ke\Omega(t) \quad (\text{II.2})$$

D'apres le principe de la dynamique on a :

$$Ci - Cr - f\Omega(p) = Jp\Omega \quad (\text{II.3})$$

$u(t)$: Tension appliquée au moteur.

$e(t)$: force contre électromotrice.

$i(t)$: Intensité du courant traversant le moteur.

$\Omega(t)$: Vitesse de rotation du moteur.

Ci : couple moteur généré.

Cr : couple résistant.

f : coefficient de frottement visqueux.

J : moment d'inertie de l'axe du moteur.

II.2. Variateur de vitesse pour moteur CC:

II.2.1 Définition variateur de vitesse :

Un variateur de vitesse est un dispositif électronique permettant d'assurer la régulation de la vitesse des moteurs électriques. Son fonctionnement repose sur l'ajustement des paramètres électriques d'alimentation, notamment la tension, le courant ou la fréquence. Pour les moteurs à courant continu, la vitesse est principalement liée à la tension appliquée, ce qui explique que le variateur agit en modifiant cette dernière afin d'obtenir la vitesse désirée. En outre, l'utilisation d'un variateur contribue à l'optimisation des performances, à la diminution de la consommation énergétique ainsi qu'à la protection du moteur contre les contraintes de fonctionnement [53].

II.2.2 Structure générale d'un variateur de vitesse pour moteur CC:

Un variateur de vitesse pour moteur à courant continu est un dispositif permettant de contrôler la vitesse du moteur en ajustant la tension et le courant qui lui sont appliqués. Sa structure générale se compose de plusieurs blocs fonctionnels essentiels :

1.Alimentation : Elle fournit la tension continue nécessaire au fonctionnement du moteur et du circuit de commande, souvent à l'aide d'un redresseur et d'un système de filtrage pour assurer une alimentation stable.

2.Circuit de commande : Il génère le signal de contrôle qui détermine la vitesse du moteur. Dans les variateurs simples, ce rôle peut être assuré par un oscillateur intégré (comme le NE555) produisant un signal MLI (modulation de largeur d'impulsion).

3.Module de puissance : Il reçoit le signal de commande et adapte la puissance électrique appliquée au moteur, à l'aide de composants tels que les transistors ou MOSFETS.

4.Moteur DC : Récepteur final de l'énergie électrique, sa vitesse varie en fonction de la tension moyenne et du signal MLI reçu.

5.Système de rétroaction (optionnel) : Des capteurs peuvent mesurer la vitesse ou le courant du moteur et renvoyer ces informations au circuit de commande pour un contrôle plus précis, notamment dans les variateurs à régulation fermée. [61]

L'ensemble de ces blocs assure non seulement un contrôle précis de la vitesse, mais contribue également à optimiser les performances du moteur, réduire la consommation énergétique et protéger le moteur contre les surcharges. Cette structure est généralement confirmée par les références académiques et industrielles sur le fonctionnement des variateurs CC. comme le montre la **Figure II.4** représentant la structure générale d'un variateur de vitesse.

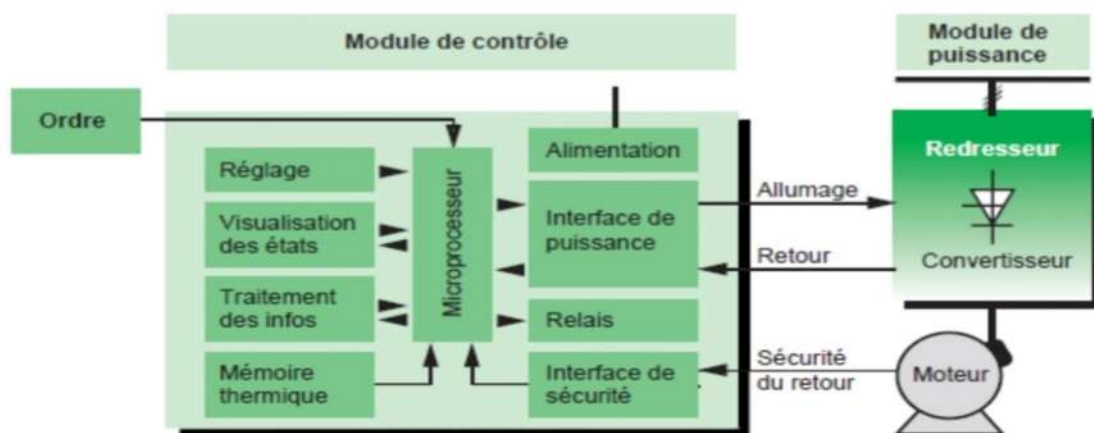


Figure II.4 : Structure générale d'un variateur de vitesse [62]

II.2.3.Principe de fonctionnement d'un variateur de vitesse pour MCC :

1.Principe général :

Un variateur de vitesse pour moteur à courant continu est un dispositif électronique permettant de contrôler la vitesse de rotation du moteur en agissant sur la grandeur électrique appliquée à son induit. Dans le cas d'un moteur à courant continu à excitation constante, la vitesse de rotation dépend principalement de la tension moyenne d'alimentation. Ainsi, la variation de cette tension permet d'obtenir une variation progressive de la vitesse [63, 64].

La vitesse d'un moteur à courant continu dépend en grande partie de la tension d'alimentation. Plus la tension moyenne appliquée au moteur est élevée, plus le moteur tourne vite. À l'inverse, si cette tension diminue, la vitesse diminue aussi [64].

Vitesse du moteur $\propto$ Tension moyenne appliquée

Donc, au lieu de changer directement la tension continue avec une alimentation variable, le variateur utilise souvent une technique appelée MLI, ou modulation de largeur d'impulsion.

2.Commande par MLI

La MLI consiste à alimenter le moteur avec une succession rapide d'impulsions électriques. Le signal alterne entre deux états :

ON: tension appliquée au moteur

OFF: tension coupée

Le moteur ne réagit pas instantanément à chaque impulsion, car il possède une certaine inertie mécanique. Il se comporte donc comme s'il recevait une tension moyenne.

Cette tension moyenne dépend du rapport cyclique [65].

3.Rapport cyclique

Dans les systèmes modernes de commande, cette variation n'est généralement pas réalisée par une diminution directe de la tension continue, car cette méthode entraîne des pertes importantes par effet Joule. On utilise plutôt la technique de modulation de largeur d'impulsion, appelée MLI . Cette méthode consiste à appliquer au moteur une tension continue sous forme d'impulsions rectangulaires de fréquence fixe ou quasi fixe, dont la durée à l'état haut est variable.

Le paramètre essentiel de cette commande est le rapport cyclique, noté généralement D

Le rapport cyclique représente la proportion du temps pendant laquelle le signal reste à l'état ON pendant une période [68] .

$$D = \frac{TON}{T} \quad (II.4)$$

où :

$$T = TON + TOFF \quad (II.5)$$

La tension moyenne appliquée au moteur est alors :

$$Vmoy = D + Valim \quad (II.6)$$

4. Rôle du circuit de commande

Dans un variateur simple, un circuit électronique génère le signal MLI. Ce circuit peut être réalisé avec :

- un circuit intégré NE555.
- un microcontrôleur comme Arduino.
- un circuit spécialisé de commande moteur.

Dans le cas d'un variateur à base de NE555, le circuit fonctionne généralement en mode astable. Le potentiomètre permet de modifier la durée de charge et de décharge du condensateur. Cela change le rapport cyclique du signal MLI, donc la tension moyenne envoyée au moteur [66, 67].

5. Rôle du transistor de puissance

Le signal MLI généré par le NE555 ou par un microcontrôleur n'est pas assez puissant pour alimenter directement le moteur. On utilise donc un composant de puissance, généralement :

- un transistor MOSFET.
- un transistor bipolaire.
- parfois un pont en H si l'on veut contrôler aussi le sens de rotation.

Le transistor agit comme un interrupteur électronique rapide. Il ouvre et ferme le circuit du moteur selon le signal MLI.

Quand le signal MLI est à l'état haut, le transistor conduit et le moteur est alimenté. Quand le signal MLI est à l'état bas, le transistor bloque et l'alimentation du moteur est coupée [70].

6. Rôle de la diode de roue libre

Le moteur CC contient des bobinages. Lorsqu'on coupe brutalement le courant, ces bobinages produisent une surtension. Cette surtension peut endommager le transistor de puissance.

Pour protéger le circuit, on place une diode de roue libre en parallèle avec le moteur. Elle permet au courant de continuer à circuler momentanément lorsque le transistor se bloque, ce qui limite les surtensions [69].

7. Fonctionnement étape par étape

Le fonctionnement peut être résumé ainsi voir **La figure II.5**

1. L'alimentation continue fournit une tension fixe, par exemple 12 V.
2. Le circuit de commande génère un signal MLI.
3. Le potentiomètre modifie le rapport cyclique du signal MLI.
4. Le transistor de puissance commute rapidement l'alimentation du moteur.
5. Le moteur reçoit une tension moyenne variable.
6. La vitesse du moteur change selon cette tension moyenne.
7. La diode de roue libre protège le transistor contre les surtensions du moteur.

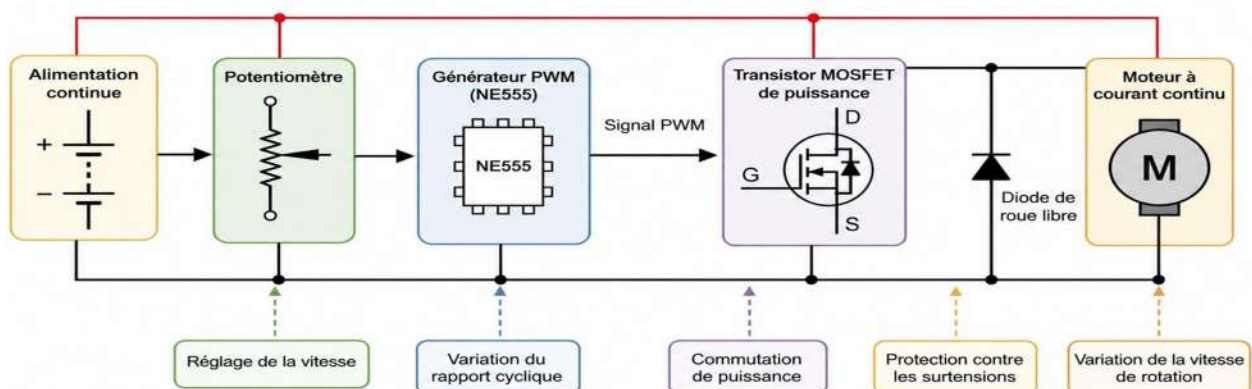


Figure II.5 : Schéma de principe d'un variateur de vitesse pour moteur à courant continu.

En résumé, le variateur de vitesse d'un moteur à courant continu repose sur la variation du rapport cyclique d'un signal MLI. Cette variation permet de modifier la tension moyenne appliquée au moteur, et donc sa vitesse de rotation, tout en conservant un bon rendement énergétique et une.

II.3 Principe de la modulation MLI:

II.3.1.MLI:

Le MLI est signal numérique donc la tension peut prendre deux valeurs seulement.

Dans certains cas très spécifiques (onduleurs à MLI par exemple) on fabrique un troisième niveau en inversant la la tension du niveau haut (**Figure II.6**) .

Le signal est carré le niveau bas correspond généralement à 0 Volt .La période est notée T

La durée de l'imposition (pour la quelle la tension est celle de l'état haut) est appelée t_h [53].

Si la période change, le signal n'est pas vraiment périodique au sens strict. On appelle alors T la pseudo période.

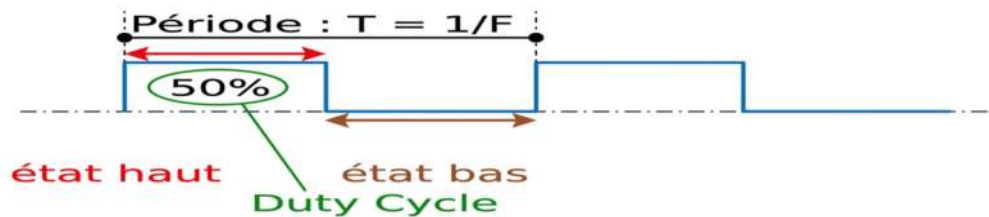


Figure II.6 : Rapport cyclique MLI [71] .

II.3.2.Principe la commende MLI:

Le principe de base de la modulation de la largeur d'impulsion MLI est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire, Ainsi ,la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la protection d'un signal MLI est de comparer entre deux signaux: [53].

- Le premier appelé signal de référence, est un signal continue qui varie entre deux seuils définis en fonction de notre application Dans notre cas, la tension de référence varie entre 10 V.
- Le second appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statistiques du Convertisseur, c'est un signal de haut fréquence par rapport du signal de référence
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs la réaliélectronique de la fonction MLI est donnée par **la figure II.7** [53]

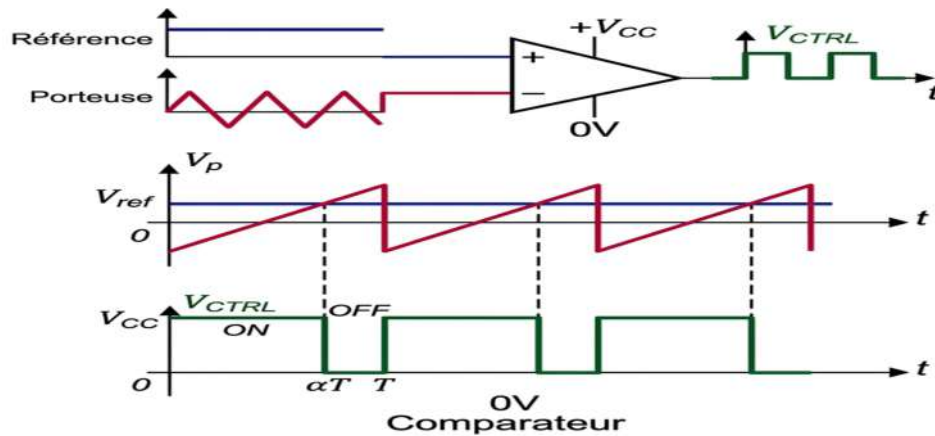


Figure II.7 : Réalisation du signal MLI [72] .

L'intersection de la référence avec la porteuse, en sens croissant, commande l'ouverture du transistor T, son intersection avec la porteuse, en sens décroissant, commande l'ouverture du transistor T, son intersection avec la porteuse, en sens décroissant, commande la fermeture de T. Le principe se fait par comparaison entre les deux signaux utilisant un amplificateur opérationnel.

II.3.3 Rapport cyclique:

On appelle Rapport cyclique le rapport $a = 100 \times t_n / T$ exprimé en pourcentage.

Si $t_n = 0$ alors $a = 0\%$ et la tension moyenne de sortie est nulle.

Si $t_n = T$ alors $a = 100\%$ et la tension moyenne de sortie est égale à V_{CC} . La figure II.8 suivante illustre cette variation du rapport cyclique.

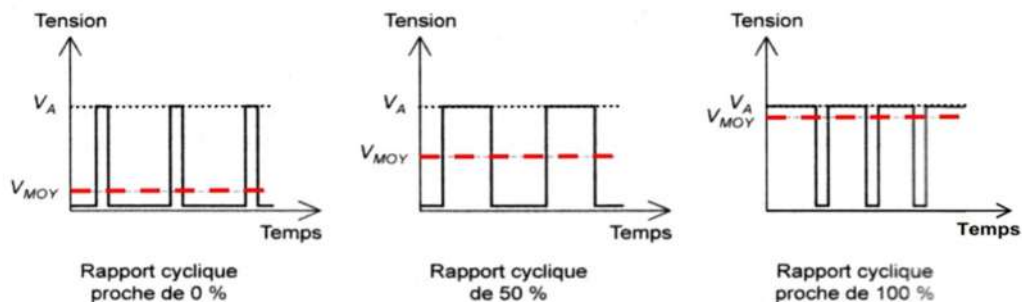


Figure II.8 : Variation du rapport cyclique [73]

Généralement tous les microcontrôleurs récents (PIC, Arduino, AVR....) peuvent générer des signaux PWM ce qui signifie pulse width modulation (ou modulation de largeur d'impulsions). Ces signaux permettent en effet de manipuler avec une grande efficacité la puissance appliquée à des charges alimentées sous une tension continue et à une possibilité de configuration interne particulière, il est très facile de générer des signaux PWM avec le rapport cyclique de notre choix.

La vitesse d'un moteur à courant continu dépend directement de la tension moyenne appliquée à ses bornes, laquelle est réglée par le rapport cyclique du signal MLI.

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet un contrôle efficace de la vitesse d'un moteur à courant continu en modifiant la tension moyenne appliquée à ses bornes. [53, 74].

II.3.4.Fonctionnement :

La MLI génère un signal carré haute fréquence dont le rapport cyclique (le pourcentage de temps d'activation) détermine la tension efficace : un rapport cyclique de 50 % correspond à la moitié de la tension nominale, réduisant ainsi proportionnellement la vitesse du moteur [53].

Contrairement à la commande par résistances dissipatives, la MLI conserve un rendement élevé car les transistors commutent rapidement entre les régimes de saturation et de blocage, minimisant ainsi les pertes thermiques [75].

II.3.5.Principaux avantages :

- Contrôle précis et linéaire de la vitesse avec des vibrations minimales, même à basse vitesse.
- Compatible avec les microcontrôleurs tels qu'Arduino ou PIC, permettant un réglage dynamique.

La fréquence idéale se situe entre 1 et 20 kHz, évitant les bruits audibles et exploitant l'inductance du moteur pour lisser le couple.[53, 75].

II.3.6.Principe général de fonctionnement :

Le variateur fonctionne en appliquant au moteur une tension moyenne variable obtenue par modulation de largeur d'impulsion (MLI) (**Figure II. 9**) .

Dans cette configuration, le circuit intégré NE555 est utilisé pour générer un signal rectangulaire dont le rapport cyclique détermine la quantité d'énergie fournie au moteur . Le mécanisme repose sur les points suivants :

- **Augmentation du rapport cyclique :** Lorsque le rapport cyclique augmente, la durée de l'état "ON" (niveau haut) devient plus longue par rapport à la période totale.
- **Contrôle de vitesse :** Cet accroissement élève la tension moyenne aux bornes de la charge, ce qui entraîne une augmentation proportionnelle de la vitesse de rotation du moteur [75].

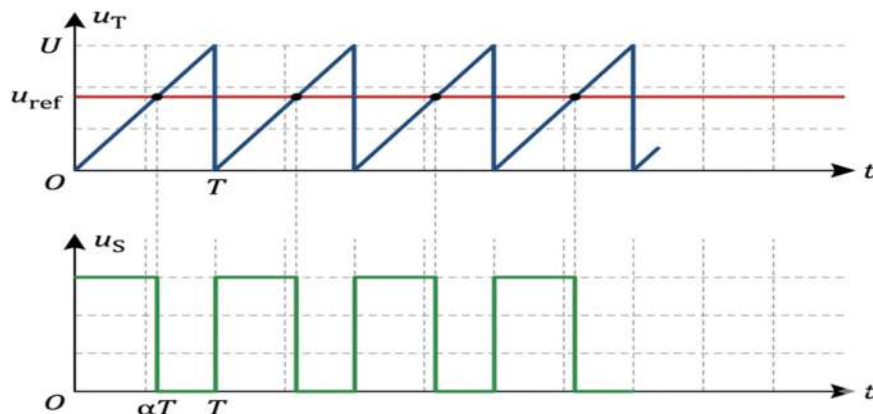


Figure II.9 : Génération du signal MLI [53].

II.4.Présentation du circuit NE555 timer IC:

II.4.1Définition :

Le circuit intégré NE555 est un temporisateur largement utilisé en électronique. Il est constitué de 23 transistors, de 2 diodes et de 16 résistances, et a été spécialement conçu pour des applications de temporisation. Grâce à ses temps de commutation très courts (inférieurs à 100 ns lors des transitions montante et descendante), il présente des performances élevées, souvent supérieures à celles des amplificateurs opérationnels [76].

Le NE555 permet de réaliser principalement deux modes de fonctionnement : le mode astable et le mode monostable. Sa simplicité de mise en œuvre et sa grande fiabilité ont contribué à son adoption dans de nombreux domaines, y compris ceux autrefois réservés à des systèmes électroniques plus complexes.

Présenté sous la forme d'un boîtier à 8 broches, le NE555 reste aujourd'hui l'un des circuits intégrés les plus utilisés pour la génération de signaux rectangulaires voir **la figure II.10** [76].



Figure II.10 : Brochage du circuit NE555 [76].

Comme le montre le brochage sur la figure, le circuit **NE555** comporte 8 broches. Il possède 3 entrées, 3 sorties et 2 bornes d'alimentation. Le **tableau II.1** suivant résume la fonction de chaque broche :

Tableau II.1: Description des broches du circuit NE555

N°	Nom	Description
1	Masse	Masse (Alimentation 0 V)
2	Déclenchement	Gâchette, amorce la temporisation (Entrée de déclenchement)
3	Sortie	Signal de sortie (La sortie principale)
4	RAZ	Remise à zéro, interruption de la temporisation (Entrée RAZ)
5	Contrôle	Accès à la référence interne ($2/3$ de VCC) (Sortie de contrôle)
6	Seuil	Signale la fin de la temporisation lorsque la tension dépasse $2/3$ de VCC
7	Décharge	Borne servant à décharger le condensateur de temporisation (Sortie décharge)
8	VCC	Tension d'alimentation, généralement entre 5 et 15 V

II.4.2.Constitution de NE555 :

Structure interne montrant le pont diviseur de tension (3 résistances de 5 K.Omega), les deux comparateurs, la bascule (Flip-Flop) et le transistor de décharge voir la figure II.11.

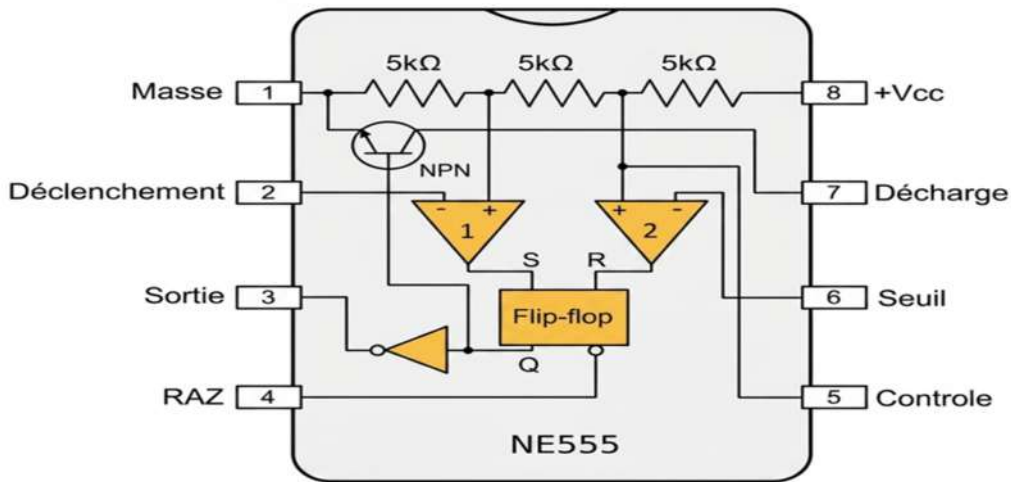


Figure II.11 : Diagramme fonctionnel interne du circuit intégré NE555 [76].

II.4.3.Fonctionnement des montages monostable et astable :

a) Monostable :

Un montage réalisant la fonction monostable est montage dont la sortie ne possède q'un seul état stable [74].

Cela signifie qu'il est possible de lui faire quitter son état stable par exemple l'état bas , suit à un ordre de commande déclenchement impliquant le passage de la sortie à l'état haut par exemple. Cette sortie reprendra automatiquement son état stable au bout d'un temps $\langle t \rangle$ [76].

La figure II.12 suivante illustre le principe de déclenchement du monostable.

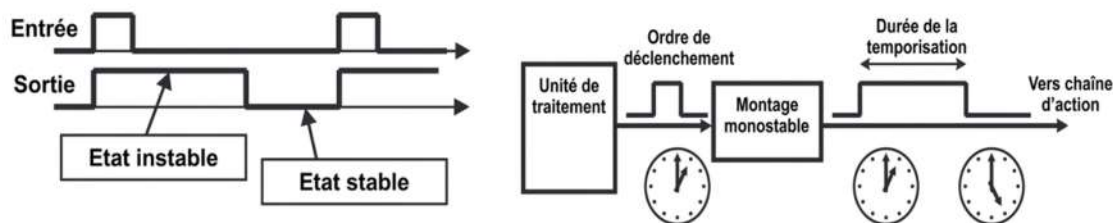


Figure II.12 : Déclenchement de monostable [76]

L'application la plus connue pour un signal de sortie monostable est celui de la cage de d'escaliers d'un immeuble. En effet son fonctionnement est similaire à celui d'un monostable En bas des escaliers, on déclenche l'éclairage pour un durée t , on trouve à chaque palier un commande de déclenchement qui permet de relancer la durée t . Même si celle lancée précédemment est un cours .

b) Astable :

Un montage astable est générateur autonome délivrant une tension rectangulaire, périodique, évoluant entre deux états instables (**Figure II.13**) [76].

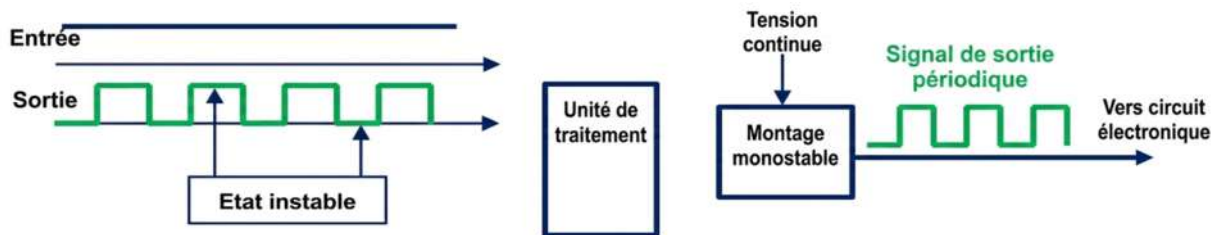


Figure II.13: Déclenchement de monostable [76].

Plusieurs structures électroniques existent, les plus employés :

Montage astable à 1 porte logique inverseurs à entrée Trigger

Montage astable à 2 portes logiques C-MOS inverseurs

Montage astable à NE555.

C) Quelques exemples avec NE555 :

Montage en monostable (a et c) pour la temporisation unique et montage en astable (b et d) pour la génération de signaux périodiques (**Figure II.14**) .

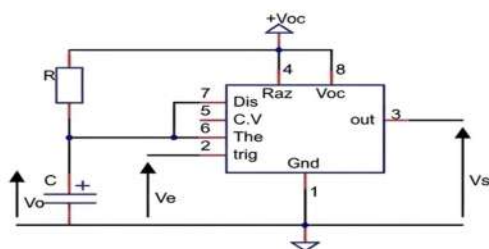


Figure II.14-a : Monostable

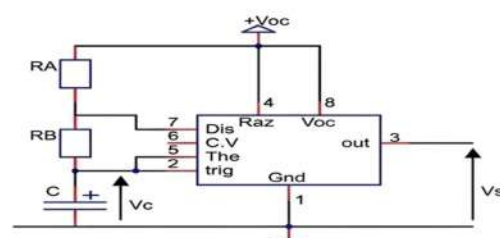


Figure II.14-b : Astable

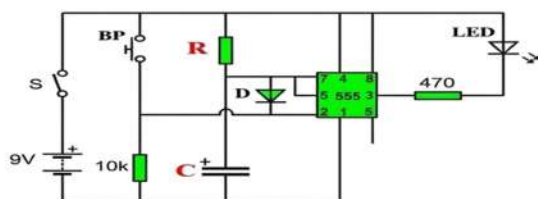


Figure II.14-c : Monostable retardé

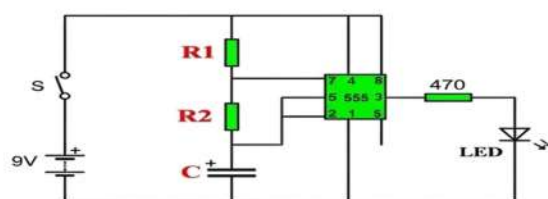


Figure II.14-d : Astable multivibrateur

Figure II.14 : Modes de fonctionnement du NE555 (Monostable et Astable) [77]

Remarque : Dans la majorité des cas le circuit doit être accompagné de composants externes (résistance, condensateurs pour pouvoir réaliser la fonction).

II.5. Sources de perturbations dans les convertisseurs statiques :

L'étude des perturbations dans les convertisseurs statiques, notamment dans les variateurs de vitesse des moteurs à courant continu (MCC), constitue un aspect central de la Compatibilité Électromagnétique (CEM). L'utilisation de dispositifs de puissance tels que les IGBT et les MOSFET, fonctionnant à haute fréquence, engendre des variations très rapides de tension (dv/dt) et de courant (di/dt), qui représentent des sources importantes de bruit électromagnétique. [53, 5]

II.5.1. Structure générale d'un convertisseur :

Un convertisseur statique est un élément essentiel de l'électronique de puissance, destiné à assurer l'adaptation et la transformation de l'énergie électrique entre une source et une charge (**Figure II.15**). De manière générale, il se compose d'une source d'alimentation (S), d'un étage de conversion de puissance, et d'un récepteur (R).

Le convertisseur reçoit une puissance électrique d'entrée, qu'il traite à travers des composants électroniques de commutation tels que les MOSFET ou les IGBT, afin de fournir une puissance de sortie adaptée aux exigences de la charge.

Son fonctionnement est commandé par un ou plusieurs signaux de contrôle, généralement basés sur la modulation de largeur d'impulsion (MLI), permettant de réguler avec précision la tension, le courant ou la vitesse dans le cas des moteurs à courant continu.

Cependant, ce processus de conversion engendre des pertes énergétiques ainsi que des commutations rapides caractérisées par de fortes variations de tension et de courant, constituant ainsi une source importante de perturbations électromagnétiques [53, 5].

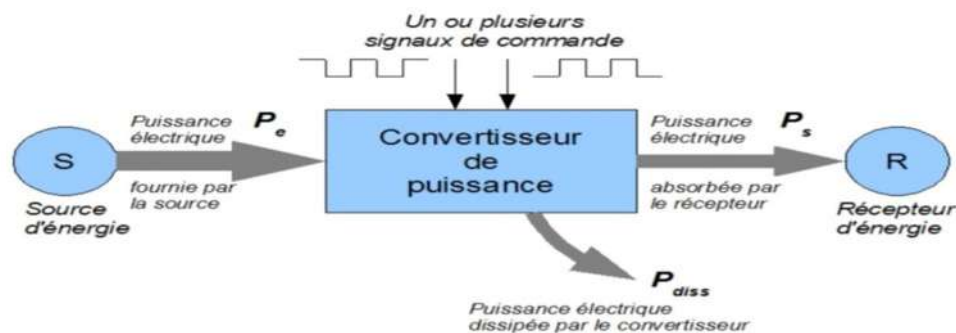


Figure II.15 : Schéma synoptique de la structure générale d'un convertisseur de puissance [78].

II.5.2. Mécanismes de génération des perturbations :

Dans les convertisseurs statiques (hacheurs ou redresseurs commandés), les commutations des semi-conducteurs ne sont pas idéales et provoquent deux principaux types d'émissions :

- Émissions conduites : Les perturbations se propagent à travers les câbles d'alimentation et de commande, généralement dans la gamme de fréquences de 150 kHz à 30 MHz.

- Émissions rayonnées : Les boucles de courant agissent comme des antennes et rayonnent des ondes électromagnétiques dans l'environnement, surtout à des fréquences supérieures à 30 MHz [5].

II.5.3. Analyse selon le type de variateur CC:

a) Hacheurs (convertisseurs CC/CC)

Cette solution est la plus utilisée pour le contrôle précis de la vitesse grâce à la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

- Source de perturbation : la fréquence de découpage, généralement comprise entre 5 kHz et 20 kHz.
- Problèmes CEM : le hachage rapide de la tension engendre des courants de mode commun qui s'écoulent vers la terre via les capacités parasites du moteur et des câbles.

Ces perturbations peuvent également affecter le fonctionnement de capteurs sensibles tels que les encodeurs [53, 5].

La Figure II.16 Réprésente Schéma de principe d'un système de puissance incluant des protections contre les rayonnements électromagnétiques.



Figure II.16 : Synoptique d'une chaîne de conversion avec hacheur et liaisons par câbles blindés [79]

b) Redresseurs commandés (AC/CC à thyristors):

Ces systèmes sont principalement utilisés pour les applications de forte puissance.

- **Source de perturbation :** les commutations liées directement à la fréquence du réseau électrique (50/60 Hz).
- **Problèmes CEM :** ils génèrent principalement des harmoniques de courant injectées dans le réseau électrique, provoquant une déformation de la tension (pollution harmonique). Cela peut entraîner l'échauffement des transformateurs et le déclenchement de protections électriques sensibles [53].

II.5.4. Les modes de propagation des perturbations:

Les perturbations électromagnétiques se propagent principalement selon deux modes : le mode différentiel et le mode commun [5].

- **Mode différentiel (DM) :**

Le courant de perturbation circule entre deux conducteurs (aller-retour). Il est généralement lié aux commutations des composants de puissance et apparaît principalement entre les lignes d'alimentation.

- **Mode commun (CM) :**

Le courant de perturbation circule dans le même sens dans plusieurs conducteurs et se referme par la terre ou la carcasse via des capacités parasites. Il est principalement dû aux variations rapides de tension et peut engendrer des émissions électromagnétiques importantes.

Figure II .17 ci-dessous illustre la répartition des courants de perturbation en mode différentiel et en mode commun dans une structure comprenant le convertisseur, les câbles et la charge

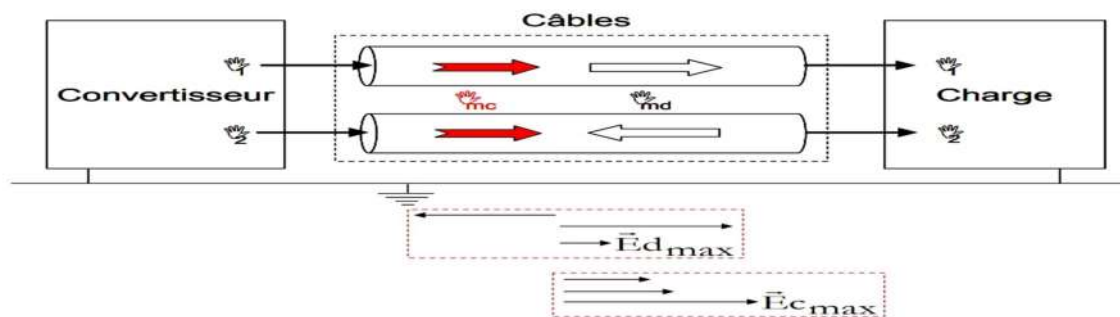


Figure II.17 : Prépondérance du mode commun sur le mode différentiel [80].

II.5.5. Techniques d'atténuation des perturbations:

Afin d'assurer la conformité d'un variateur de vitesse aux normes de Compatibilité Électromagnétique (CEM), plusieurs méthodes de réduction des perturbations sont mises en œuvre :

- **Filtrage** : L'installation de filtres secteur, notamment des inductances de ligne, permet de limiter la propagation des perturbations vers le réseau électrique. Des condensateurs de type X et Y sont également utilisés pour évacuer les courants de mode commun.
- **Blindage** : Le recours à des câbles blindés entre le convertisseur et le moteur, associé à une mise à la terre efficace sur 360°, contribue à réduire les émissions électromagnétiques.
- **Câblage** : Une séparation physique entre les câbles de puissance (courants élevés) et les câbles de commande (signaux faibles) est essentielle pour minimiser les phénomènes de couplage et de diaphonie.
- **Circuits d'amortissement** : L'utilisation de dispositifs d'aide à la commutation, tels que les circuits Snubber, permet de diminuer la rapidité des variations de tension (dv/dt) et donc de réduire les perturbations générées. [53, 5]

II.5.6. Synthèse pour le moteur à courant continu (CC):

Le moteur à courant continu présente une sensibilité particulière du point de vue CEM. En effet, la présence du collecteur et des balais engendre des micro-arcs électriques, constituant des sources de perturbations haute fréquence. Ces dernières s'ajoutent aux perturbations issues du convertisseur statique. Par conséquent, une approche globale de la CEM doit prendre en compte à la fois l'électronique de puissance et les aspects électromécaniques du moteur [53].

Les perturbations électromagnétiques dans les convertisseurs statiques proviennent principalement des commutations rapides, des courants de mode commun, du routage des circuits et des câbles qui agissent comme des antennes, ce qui rend la maîtrise de la CEM essentielle dans les variateurs de vitesse [5].

II.6. Impact des commutations rapides (dv/dt, di/dt) :

Les commutations rapides (**dv/dt** et **di/dt**) en électronique de puissance améliorent le rendement, mais engendrent des contraintes importantes : apparition de surtensions (pics de tension), déclenchements indésirables des composants, ainsi que de fortes perturbations électromagnétiques (CEM) . Ces variations rapides imposent la mise en place de solutions de protection telles que les circuits snubber, les filtres ou encore une commande adaptée de la grille, afin de prévenir la défaillance des semi-conducteurs [53].

II.6.1. Impact du dv/dt (Variation de tension) :

Le dv/dt correspond à la rapidité avec laquelle la tension passe de l'état bloqué à l'état passant. Lorsque les fronts de commutation sont très raides (de l'ordre de plusieurs kV/μs), plusieurs effets indésirables apparaissent :

- **Courants capacitifs** : des courants parasites se développent à travers les capacités parasites des composants, du circuit imprimé et des isolations, selon la relation :

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (\text{II.7})$$

- **Dégradation de l'isolation** : la répétition des pics de tension et les phénomènes de réflexion (notamment dans les câbles longs) peuvent engendrer des décharges partielles, accélérant la détérioration des isolants (bobinages de moteurs, transformateurs).
- **Perturbations électromagnétiques (CEM)** : un dv/dt élevé constitue une source majeure de perturbations conduites et rayonnées, en particulier en mode commun.
- **Risque de conduction intempestive** : un dv/dt important au niveau du drain ou du collecteur peut injecter un courant dans la grille via la capacité de Miller (C_{gd}), entraînant

un déclenchement involontaire et pouvant provoquer un court-circuit de bras (shoot-through).
[5]

II.6.2. Impact du di/dt (Variation de courant) :

Le di/dt correspond à la vitesse d'établissement ou d'interruption du courant. Des variations rapides du courant peuvent entraîner plusieurs effets indésirables :

- **Surtensions inductives** : en présence d'inductances parasites (liées au câblage ou aux boîtiers), une variation brusque du courant génère des surtensions proportionnelles au di/dt , comme l'exprime la relation :

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Ces surtensions peuvent dépasser la tension de claquage des composants (V_{BR}) et provoquer leur dégradation.

- **Pertes de commutation** : bien que des commutations rapides réduisent en théorie les pertes en limitant le temps de recouvrement simultané de la tension et du courant, un di/dt mal contrôlé accentue les phénomènes de recouvrement inverse des diodes, ce qui augmente les pertes et la dissipation thermique.
- **Bruit magnétique** : les variations rapides du courant génèrent des champs magnétiques variables susceptibles de perturber les circuits de commande sensibles situés à proximité.
[78].

II.6.3. Synthèse des effets :

Le tableau II.2 ci-dessous synthétise les principaux effets des commutations rapides en conception électronique, ainsi que les solutions généralement adoptées : [50]

Tableau II.22: Résumé des phénomènes, conséquences et solutions liés aux commutations rapides

Phénomène	Conséquence principale	Solution typique
Haut dv/dt	Engendre des courants de mode commun et accélère le vieillissement des isolants.	Utilisation de filtres dv/dt , du blindage et de drivers isolés.
Haut di/dt	Provoque des surtensions aux bornes des interrupteurs.	Recours à des circuits snubber et à des busbars laminés à faible inductance.
Effets combinés	Génèrent des émissions de bruit radiofréquence (EMI).	Optimisation du routage, utilisation de plans de masse et de ferrites.

Bien que l'augmentation du dv/dt et du di/dt permette d'améliorer le rendement global en réduisant l'énergie perdue lors des commutations, elle impose des contraintes très strictes sur le routage (layout) du circuit. La réduction des boucles d'inductance ainsi que l'utilisation de drivers de grille performants deviennent alors essentielles pour tirer parti de ces performances tout en préservant la fiabilité du système.

II.7. Analyse des perturbations conduites et rayonnées :

II.7.1 Origine des perturbations dans les variateurs de vitesse:

Les variateurs de vitesse reposent sur une technique de découpage rapide de la tension et du courant à l'aide de la modulation de largeur d'impulsion (MLI), ce qui permet un contrôle précis de la vitesse des moteurs électriques. Cependant, cette méthode entraîne des variations brusques et importantes de la tension et du courant, ce qui engendre à son tour des perturbations électromagnétiques [5].

Ces perturbations peuvent se propager par les câbles ou se diffuser dans l'air, et elles peuvent affecter les équipements voisins, provoquant parfois des interférences ou des dysfonctionnements dans les dispositifs électroniques sensibles [5].

Les variateurs de vitesse utilisent une technique de commutation rapide de la tension et du courant basée sur la modulation de largeur d'impulsion (MLI). Ces commutations engendrent des variations rapides et importantes de la tension et du courant (dv/dt et di/dt élevés), à l'origine de perturbations électromagnétiques. Celles-ci peuvent se propager le long des câbles (perturbations conduites) ou se diffuser dans l'air (perturbations rayonnées), pouvant ainsi perturber les équipements environnants [5].

Cette **figure II.18** décrit la Propagation des perturbations par conduction (câbles) et par rayonnement (champs EM)

entre le réseau, le variateur CC et le moteur.

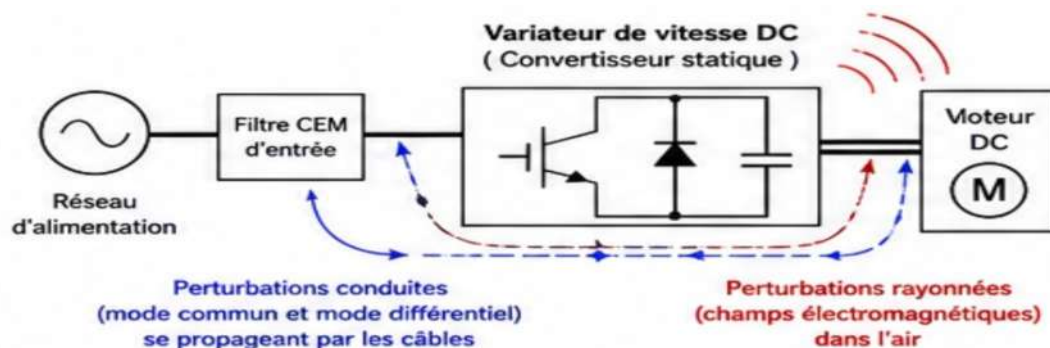


Figure II.18: Types de perturbations électromagnétiques (conduites et rayonnées) [81]

II.7.2. Source de perturbations :

Les opérations de commutation rapide au sein des composants de puissance tels que les IGBT et les MOSFET constituent la principale source des perturbations électromagnétiques dans les systèmes de variateurs de vitesse. Ces dispositifs fonctionnent selon la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui repose sur des commutations rapides du courant, entraînant ainsi des variations brusques de la tension et du courant[82, 83].

Ces variations se caractérisent par des valeurs élevées de (dv/dt) et de (di/dt) , ce qui conduit à la génération d'un large spectre de hautes fréquences. Par conséquent, des signaux parasites se forment et se propagent dans le circuit électrique, représentant une cause majeure des interférences électromagnétiques au sein du système et à l'extérieur de celui-ci. Comme illustré dans la figure II.19, les formes d'onde présentent des variations rapides caractéristiques d'un hacheur MLI. [82].

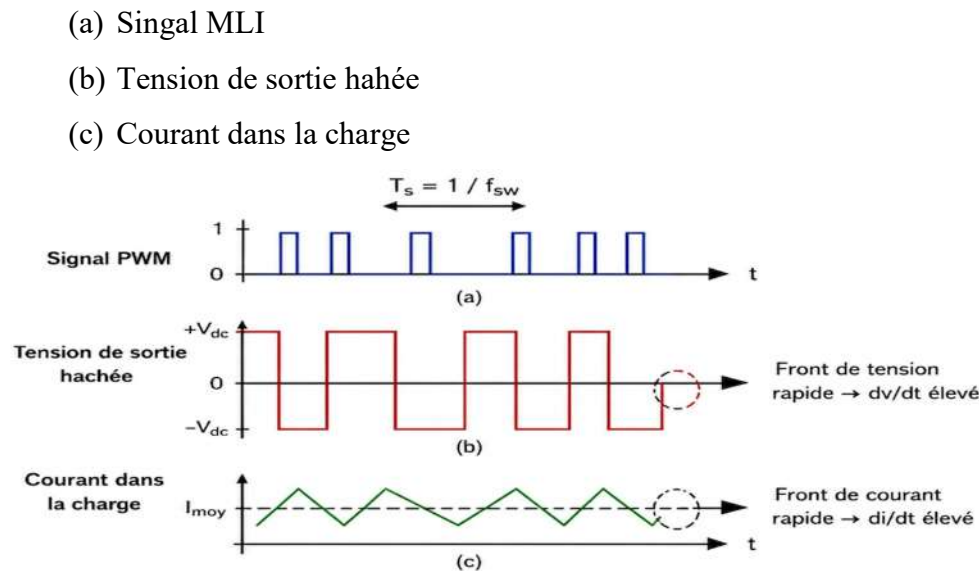


Figure II.19 : Formes d'onde d'un hacheur MLI [78]

II.7.3. Perturbations conduites:

Les perturbations conduites constituent l'une des principales formes d'interférences électromagnétiques dans les variateurs de vitesse. Elles se propagent à travers les câbles d'alimentation reliant la source d'énergie, le variateur et le moteur électrique [82].

Elles sont principalement dues aux commutations rapides des composants de puissance (IGBT et MOSFET), qui engendrent des variations brusques de tension et de courant (dv/dt et di/dt).

Ces perturbations se propagent le long des conducteurs sous forme de courants parasites et peuvent être classées en deux modes :

Mode commun : Les courants circulent dans le même sens par rapport à la terre.

Mode différentiel : Les courants circulent en sens opposés entre deux conducteurs.

Ces phénomènes provoquent des perturbations sur le réseau d'alimentation et peuvent affecter les autres équipements connectés à la même source, ce qui dégrade la qualité de l'énergie électrique et

la stabilité du système [82]. La **figure II.20** suivante illustre la propagation des perturbations conduites en mode différentiel et en mode commun

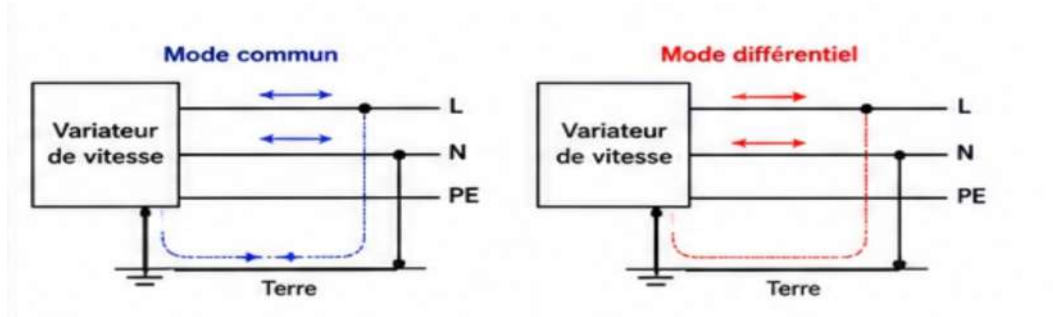


Figure II.20 : Propagation des perturbations conduites en mode différentiel et mode commun [84].

II.7.4. Perturbations rayonnées:

Contrairement aux perturbations conduites, les perturbations rayonnées se propagent dans l'espace sous forme de champs électromagnétiques sans support physique comme les câbles (**Figure II.21**) .

Elles sont générées par les commutations rapides de tension et de courant dans le variateur de vitesse, notamment en présence de câbles longs ou de boucles de courant importantes [83].

Ces conducteurs peuvent se comporter comme des antennes involontaires, rayonnant des ondes électromagnétiques dans l'environnement. Cela peut affecter les équipements électroniques proches, même en l'absence de connexion électrique directe [83].

Ces effets se manifestent généralement par des interférences dans les signaux ou des dysfonctionnements des systèmes sensibles .

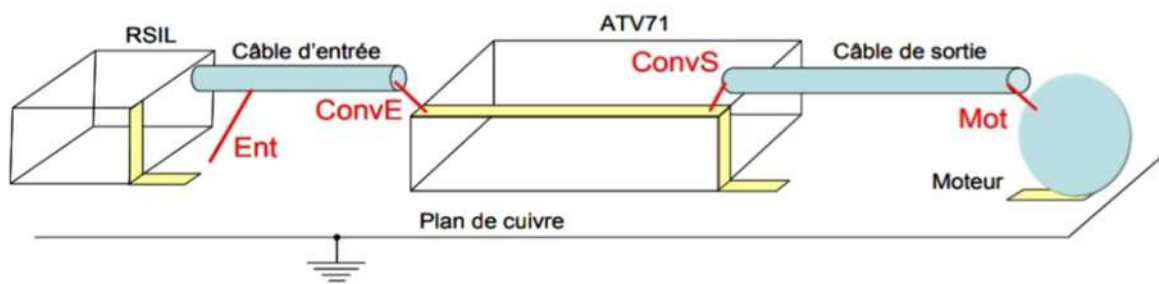


Figure II.21 : Schéma d'une chaîne d'entraînement avec RSIL et plan de masse [85].

II.7.5. Effets des perturbations électromagnétiques sur les équipements voisins :

Les perturbations électromagnétiques (PEM) générées par les variateurs de vitesse à modulation de largeur d'impulsion (MLI) peuvent perturber le fonctionnement des équipements voisins en provoquant des dysfonctionnements liés aux interférences conduites et rayonnées.

Ces variateurs, largement utilisés pour le contrôle des moteurs asynchrones, produisent des harmoniques de forte amplitude ainsi que des fronts de commutation très rapides dus à l'utilisation des interrupteurs de puissance de type IGBT, ce qui engendre des courants de fuite et des surtensions [84].

Dans ce contexte, la compatibilité électromagnétique (CEM) représente une problématique essentielle, car ces dispositifs peuvent émettre des perturbations dépassant les limites fixées par les normes, notamment la norme IEC 61800-3. Ces émissions peuvent affecter les équipements environnants tels que les systèmes de communication, les automates programmables (PLC) et les capteurs. En l'absence de mesures de protection appropriées, les perturbations se propagent soit par conduction à travers les câbles, soit par rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques, dégradant ainsi la qualité des signaux [85].

Les effets observés sur les équipements voisins se manifestent principalement par des interférences de communication entraînant des pertes de données sur les liaisons numériques (RS485, réseaux industriels ou radio), des dysfonctionnements électroniques tels que des déclenchements intempestifs des relais ou des automates, ainsi que des phénomènes d'échauffement et de dégradation d'isolement dans les moteurs en cas de longues longueurs de câbles soumises à des surtensions réfléchies [84, 84]

Afin de limiter ces perturbations, plusieurs mesures correctives peuvent être mises en œuvre, notamment l'utilisation de filtres CEM en entrée et en sortie des variateurs, le recours à des câbles blindés et torsadés, ainsi que la mise en place d'une mise à la terre équipotentielle efficace. L'application de ces solutions permet de réduire significativement les émissions perturbatrices et d'assurer le respect des exigences de la compatibilité électromagnétique [84].

II.8. Les inconvénients des variateurs de vitesse :

Les variateurs de fréquence (VSD) utilisent des dispositifs de commutation tels que des diodes, des thyristors et des transistor IGBT. Ces composants introduisent des charges non linéaires dans le réseau électrique, générant des courants harmoniques et des distorsions de tension [78].

Ces perturbations peuvent affecter le fonctionnement normal des équipements électriques chez l'utilisateur et au sein même du réseau, notamment en l'absence de filtrage ou de protection adéquat. De plus, une résonance harmonique peut se produire entre le VSD et les condensateurs du système.

Par conséquent, ces effets indésirables les peuvent entraîner :

- Une défaillance prématurée des équipements
- Un surchauffe des moteurs, des câbles et des transformateurs

- Un dégradation de l'isolation

Et des interruptions de service (par exemple, la fusion des fusibles) [78].

II.9. Les avantages des variateurs de vitesse :

L'utilisation de variateurs de fréquence offre plusieurs avantages des :

- Démarrage progressif du moteurs ,réduisant la chute de tension et le courant de démarrage
- facture de puissance amélioré
- contrôle de vitesse plus précis
- Durée de vie des équipements prolongée

Consommation d'énergie réduite.

Les variateurs modernes garantissent le fonctionnement continu des équipements, même en cas de coupure de courant temporaire [78].

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié les bases de la variation de vitesse des moteurs à courant continu, en présentant les principales techniques de commande. Une attention particulière a été accordée à la modulation de largeur d'impulsion (MLI), reconnue pour sa précision et son rendement énergétique élevé.

Par ailleurs, nous avons mis en évidence l'intérêt du circuit intégré NE555 comme solution simple et efficace pour la génération du signal MLI dans les systèmes de commande des MCC.

Cependant, l'utilisation de ce type de commande, basée sur des commutations rapides, peut être à l'origine de perturbations électromagnétiques, ce qui constitue un aspect essentiel à prendre en compte dans le cadre de la compatibilité électromagnétique (CEM).

Ainsi, ces éléments justifient la poursuite de ce travail par une étude expérimentale. Le chapitre suivant sera donc consacré à la réalisation pratique du variateur de vitesse à base de NE555, ainsi qu'à l'analyse des émissions électromagnétiques associées

Chapitre III :
Réalisation expérimentale du
variateur et étude CEM

Introduction

Dans le domaine de l'ingénierie électrique et de l'électronique de puissance, la maîtrise précise et efficace de la vitesse des moteurs à courant continu (MCC) représente un enjeu technologique important. Les méthodes classiques de variation de vitesse, telles que l'utilisation de résistances en série, se distinguent par leur simplicité, mais restent peu performantes en raison des pertes énergétiques élevées sous forme de chaleur.

Face à ces limitations, la technique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) s'est imposée comme une solution moderne et efficace. Elle permet d'améliorer considérablement le rendement énergétique grâce à l'utilisation de composants de puissance fonctionnant en mode de commutation, c'est-à-dire alternativement saturés ou bloqués.

Le présent travail vise à étudier, sur les plans théorique et expérimental, un système de commande de vitesse simple, économique et fiable, basé sur le circuit intégré NE555 configuré en mode astable, associé à un transistor de puissance de type MOSFET IRF540.

Cette étude s'articule autour de deux axes principaux. **Le premier consiste** à décrire et à caractériser le montage en analysant le rôle de chaque composant, notamment le générateur MLI à base de NE555, le potentiomètre de réglage du rapport cyclique, l'étage de puissance ainsi que les dispositifs de protection comme la diode de roue libre. **Le second axe** porte sur l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux, en évaluant l'influence des conditions de fonctionnement sur la qualité des signaux appliqués au moteur.

À cet effet, des analyses temporelles et fréquentielles (via la Transformée de Fourier Rapide – FFT) sont réalisées, aussi bien à vide qu'en charge, tout en mettant en évidence l'impact des éléments de liaison tels que les câbles d'alimentation et les câbles coaxiaux.

III.1 La description du montage du variateur de vitesse

Le montage réalisé (voir la **figure III.1** et **III.2**) est un variateur de vitesse pour moteur à courant continu basé sur le circuit intégré **NE555**. Ce circuit fonctionne en mode **astable** afin de générer un signal rectangulaire périodique de type **MLI**, c'est-à-dire une modulation de largeur d'impulsion.

Le principe du montage consiste à faire varier le rapport cyclique du signal MLI appliqué au moteur. Le rapport cyclique représente la durée pendant laquelle le signal reste à l'état haut pendant une période complète. Lorsque ce rapport cyclique augmente, la tension moyenne appliquée au moteur augmente également, ce qui provoque une augmentation de sa vitesse. Inversement, lorsque le rapport cyclique diminue, la tension moyenne diminue et le moteur tourne plus lentement.

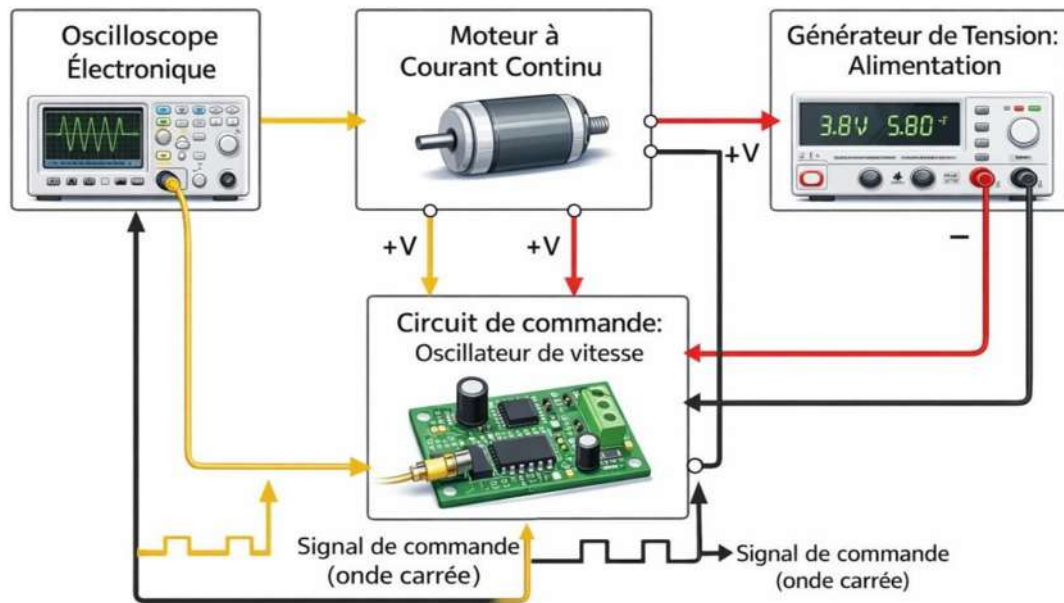


Figure III.1 : Montage du variateur de vitesse

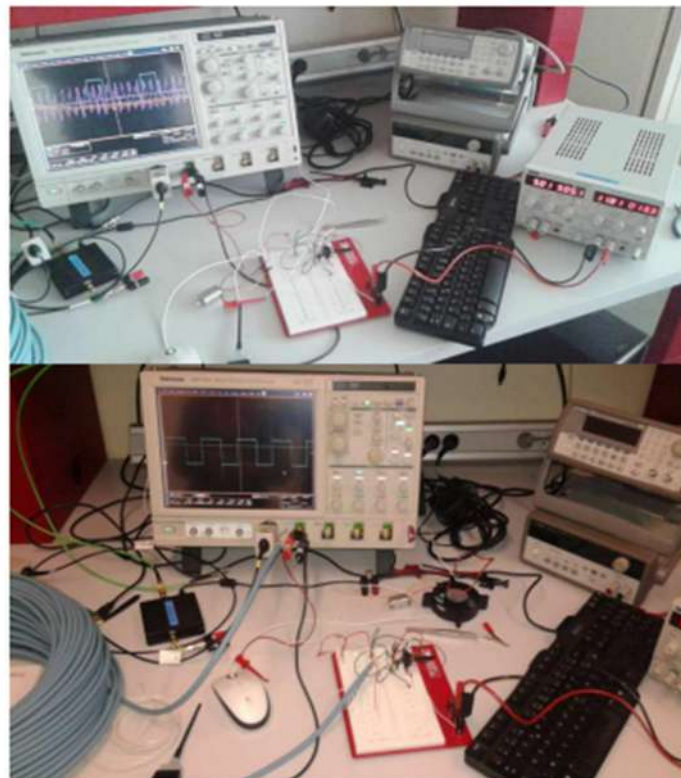


Figure III.2 : Montage expérimental du variateur de vitesse

III.1.1 Constitution générale du montage

La **figure III.3** montre notre circuit du variateur de vitesse à base de NE555 protégé par un transistor de puissance de type MOSFET. Il fonctionne comme un interrupteur électronique rapide.

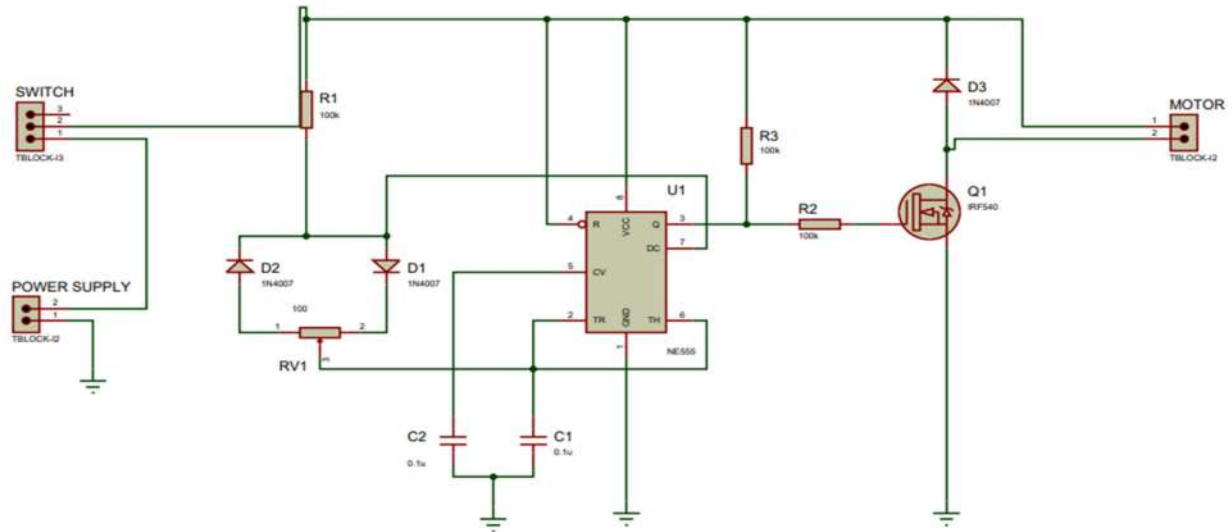


Figure III.3 : Bloc de commande (générateur MLI à base de NE555) utilisé dans les expériences.

Le montage est composé principalement des éléments suivants :

➤ POWER SUPPLY

C'est la source d'alimentation continue du montage. Elle fournit :

- le +V au NE555 et au moteur,
- la masse commune au NE555, au MOSFET et au reste du circuit.

➤ **SWITCH**

C'est l'organe de mise en marche / arrêt ou de commande générale du variateur.

Il permet d'appliquer ou de couper l'alimentation du circuit de commande.

➤ **UI : NE555**

C'est le cœur du variateur.

Ici, le NE555 est utilisé comme générateur d'impulsions MLI :

- il produit un signal rectangulaire périodique,
- la largeur des impulsions varie,
- cette variation agit sur la tension moyenne appliquée au moteur, donc sur sa vitesse.

Autrement dit, le NE555 ne change pas directement la tension analogique du moteur, il envoie une suite d'impulsions plus ou moins larges.

➤ **RV1 (potentiomètre)**

C'est le réglage de vitesse.

En tournant RV1, on modifie le rapport cyclique du MLI :

- impulsion plus large → tension moyenne plus grande → moteur plus rapide .
- impulsion plus étroite → tension moyenne plus faible → moteur plus lent.

C'est donc lui qui joue le rôle de "bouton de vitesse".

➤ **D1 et D2**

Ces deux diodes servent à séparer les chemins de charge et de décharge du condensateur de temporisation. Leur rôle principal est de permettre au potentiomètre RV1 de faire varier le rapport cyclique plus facilement, sans trop perturber la fréquence.

En pratique :

- une diode intervient pendant la charge,
- l'autre pendant la décharge.

C'est une méthode classique pour faire un MLI avec NE555.

➤ **C1 :**

C'est le condensateur de temporisation principal du NE555.

Avec RV1, D1, D2 et les résistances autour, il fixe :

- la période du signal,
- donc la fréquence du MLI.

Sans ce condensateur, le NE 555 ne pourrait pas osciller correctement.

➤ **C2 :**

C'est un condensateur de filtrage / stabilisation.

Il sert à rendre le fonctionnement du NE555 plus stable et à réduire les perturbations.

Il aide à éviter les oscillations parasites ou les déclenchements indésirables.

➤ **R1 :**

R1 participe au réseau de polarisation et de temporisation du NE555.

Elle aide à fixer la plage de fonctionnement du montage et intervient dans la charge/décharge liée au MLI.

On peut la voir comme une résistance qui contribue à encadrer le réglage effectué par RV1.

➤ **R2 :**

R2 est la résistance de grille du MOSFET.

Son rôle est important :

- elle limite le courant instantané envoyé vers la grille.
- elle protège la sortie du NE555.
- elle réduit les oscillations parasites de commande.
- elle rend la commutation du MOSFET plus propre.

➤ **R3 :**

R3 est une résistance de polarisation de la ligne de commande.

Son rôle est de maintenir un état défini sur la commande, notamment au démarrage ou dans les transitions, afin d'éviter un comportement flottant.

Même si le NE555 pilote déjà le MOSFET, cette résistance aide à stabiliser la commande.

➤ **Q1 = IRF540 :**

C'est le transistor de puissance du montage.

Il fonctionne comme un interrupteur électronique rapide :

- quand il conduit, le courant passe dans le moteur,
- quand il bloque, le courant est coupé.

Le NE555 ne peut pas alimenter directement le moteur, donc il commande Q1, et c'est Q1 qui fait le travail de puissance.

Le choix d'un **MOSFET** est logique ici, car il commute rapidement et convient bien à une commande PWM.

➤ **D3 = 1N4007 :**

C'est la diode de roue libre.

Elle est indispensable avec une charge inductive comme un moteur.

Quand le MOSFET coupe brutalement le courant, le moteur essaie de maintenir ce courant à cause de son inductance.

Sans diode de roue libre :

- on aurait de fortes surtensions,
- on risquerait d'endommager le MOSFET.

Donc D3 :

- absorbe l'énergie de retour,
- protège le transistor,
- réduit les pics de tension.

C'est une partie essentielle du montage.

➤ **MOTOR :**

C'est la charge commandée par le variateur (MCC très basse tension).

Le moteur reçoit une tension hachée en MLI :

- il ne voit pas une tension continue parfaitement lisse.
- mais une succession d'impulsions.
- et sa vitesse dépend de la valeur moyenne de ces impulsions.

III.1.2 Lecture globale du fonctionnement :

Le montage fonctionne ainsi :

1. le NE555 génère un signal MLI.
2. RV1 modifie le rapport cyclique.
3. ce signal attaque la grille de Q1 via R2.
4. Q1 hache l'alimentation du moteur.
5. D3 protège le circuit lors des coupures.
6. le moteur tourne plus ou moins vite selon la largeur des impulsions.

Les pics visualisés sur l'oscilloscope viennent surtout de la partie :

- Q1
- D3
- moteur
- fils / parasites de câblage

À vide, ces transitoires sont plus visibles, car le système est moins amorti.

Le variateur est basé sur un NE555 monté en générateur MLI. Le potentiomètre RV1 permet de régler le rapport cyclique du signal, donc la vitesse du moteur. Le MOSFET IRF540 assure la commutation de puissance, tandis que la diode D3 protège le montage contre les surtensions dues au caractère inductif du moteur. Les diodes D1 et D2 permettent d'agir séparément sur les temps de charge et de décharge du condensateur de temporisation, ce qui facilite le réglage du rapport cyclique.

III.1.3 Fonctionnement du NE555 dans le montage :

Le NE555 est utilisé comme un oscillateur astable. Dans ce mode, il produit automatiquement un signal carré à sa sortie, sans nécessiter de signal d'entrée externe.

Les broches principales du NE555 sont câblées de la manière suivante Voir le **tableau III.1** :

Tableau III.1 : Les broches du NE555

Broche du NE555	Fonction	Connexion typique
1	Masse	Reliée au 0 V
2	Trigger	Reliée au condensateur de temporisation
3	Sortie	Reliée à la commande du transistor/MOSFET
4	Reset	Reliée au +Vcc pour activer le circuit
5	Control Voltage	Reliée à la masse à travers un petit condensateur, souvent 10 nF
6	Threshold	Reliée au condensateur de temporisation
7	Discharge	Reliée au réseau de résistances et au potentiomètre
8	Alimentation	Reliée au +Vcc

Les broches **2** et **6** sont généralement reliées ensemble afin de permettre la charge et la décharge du condensateur. Le condensateur se charge et se décharge à travers les résistances et le potentiomètre, ce qui détermine la durée des états haut et bas du signal de sortie.

III.2 Description synthétique du câblage :

Le NE555 est alimenté par une tension continue. Sa sortie, située sur la broche 3, fournit un signal MLI. Ce signal attaque la grille d'un MOSFET à travers une résistance de limitation. Le moteur est placé entre le pôle positif de l'alimentation et le drain du MOSFET. La source du MOSFET est reliée à la masse.

Lorsque le MOSFET est commandé par le signal MLI, il autorise ou bloque le passage du courant dans le moteur. La vitesse du moteur varie donc en fonction de la largeur des impulsions générées par le NE555.

Un condensateur de filtrage peut être ajouté aux bornes de l'alimentation pour réduire les perturbations électriques. Un petit condensateur peut également être placé aux bornes du moteur afin de diminuer les parasites générés par les balais du moteur.

III.3 Interprétation du fonctionnement :

Ce montage permet de contrôler efficacement la vitesse d'un moteur CC sans dissiper beaucoup d'énergie sous forme de chaleur. Contrairement à une variation de vitesse par résistance série, la commande MLI conserve un bon rendement, car le transistor de puissance travaille principalement en commutation : soit complètement passant, soit complètement bloqué.

Ainsi, le variateur à base de NE555 constitue une solution simple, économique et fiable pour la commande de petits moteurs à courant continu. Il est particulièrement adapté aux

applications pédagogiques, aux mini-projets électroniques, aux systèmes embarqués simples et aux dispositifs de réglage de vitesse à faible ou moyenne puissance.

III.4. Interprétations des résultats :

III.4.1. La sortie de la capacité du variateur de vitesse seul sans charge :

La **Figure III.4** montre le comportement des capacités de la carte de commande. Celle-ci représente la réponse du signal temporel aux bornes de la capacité (100 nF) (charge et décharge). On constate qu'il y'a présence des perturbations électromagnétiques jusqu'à la fréquence 5kHz

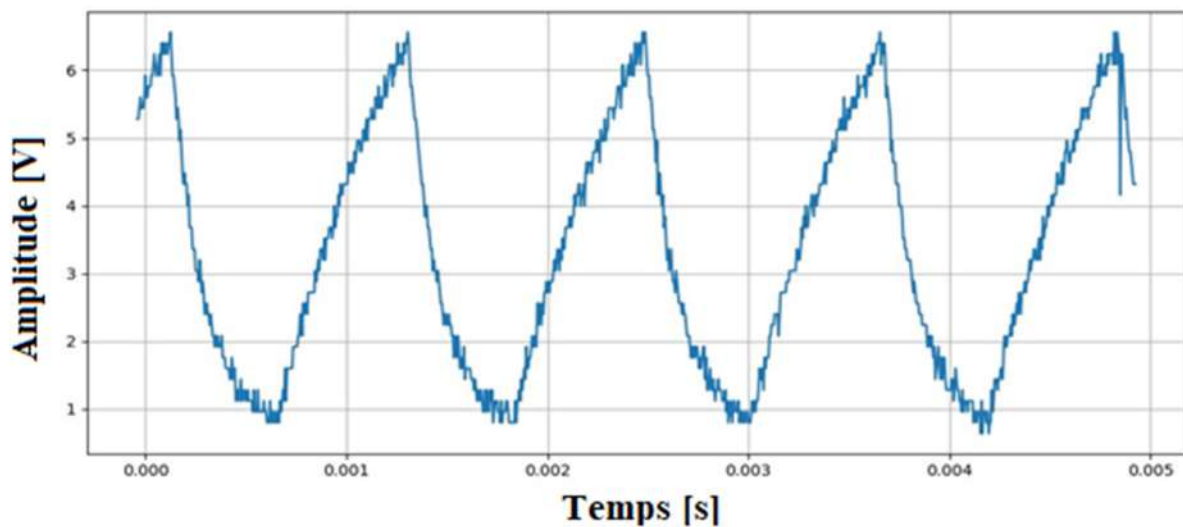


Figure III.4 : Réponse temporelle de la Charge et décharge d'une capacité

L'analyse spectrale du signal par transformée de Fourier rapide met en évidence une composante dominante située à environ 804,83 Hz, correspondant à la fréquence fondamentale du signal. Cette raie principale, normalisée à 0 dB, traduit la périodicité dominante du phénomène observé.

La présence de plusieurs composantes secondaires de plus faible amplitude montre que le signal n'est pas purement sinusoïdal. Cette observation est cohérente avec la forme temporelle du signal, qui présente une allure périodique déformée, proche d'une rampe ou d'une dent de scie. Un tel signal possède naturellement un contenu harmonique plus riche qu'une sinusoïde idéale.

Cette courbe est la signature directe du fonctionnement interne du NE555 en mode astable. Elle visualise en temps réel le processus de charge/décharge de la capacité qui génère le signal MLI. La présence du câble d'alimentation introduit un bruit visible sur les rampes et une légère déformation des seuils, mais n'empêche pas le fonctionnement correct du variateur.

La **figure III.5** montre le comportement fréquentielle de la Charge et décharge aux bornes de la capacité (100 nF) (charge et décharge)

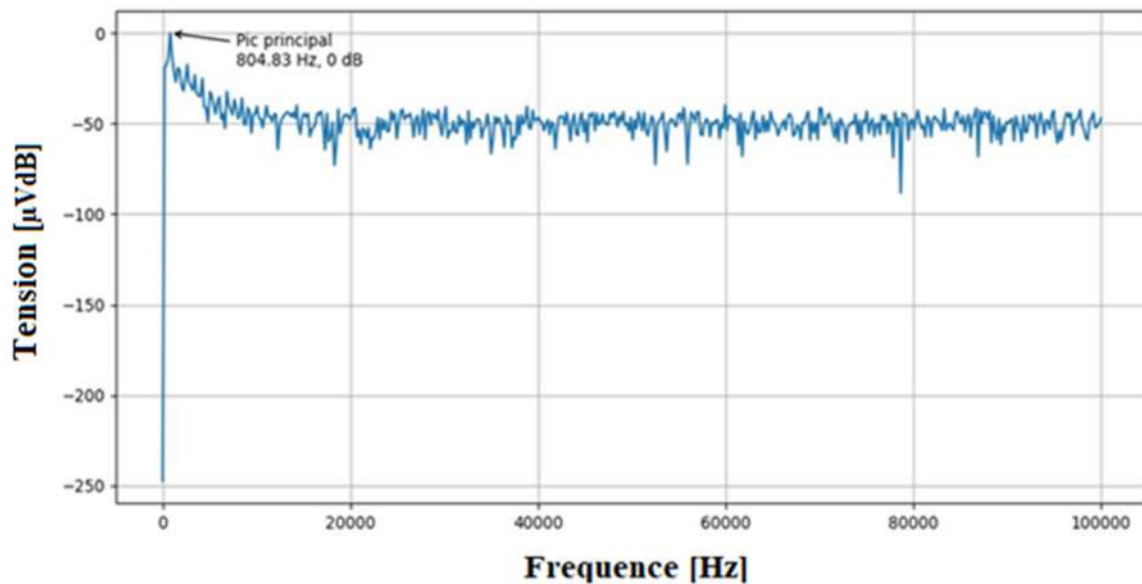


Figure III.5 : Réponse fréquentielle de la Charge et décharge d'une capacité

L'Analyse zone par zone de la **figure III.5** est comme suit :

1. Pic fondamental à 804.83 Hz — 0 dB

Il signifie la fréquence précisément identifiée par l'annotation sur la courbe, la Cohérente avec toutes les mesures précédentes (~1000 Hz avec légère variation de réglage). Le pic représente l'énergie principale du signal de charge/décharge et que toute l'énergie qui est concentrée sur ce seul pic est un signal quasi-pur.

2. Descente verticale à -250 dB (0 → ~2 kHz).

La descente haute à -250 dB sur le graphe représente simplement le plancher de dynamique de l'instrument de mesure (résolution FFT), pas une vraie valeur physique.

3. Plancher plat à -50 dB (2 kHz – 100 kHz)

Après la chute initiale, le spectre se stabilise à -50 dB sur toute la plage haute fréquence.

Ce plancher à -50 dB est 50 dB en dessous du fondamental → le signal est extrêmement propre spectralement.

4. Creux profond à ~80 kHz (≈ -90 dB).

Un creux isolé et très profond apparaît vers 80 kHz.

Cette courbe fréquentielle du signal de charge/décharge capacitive est la plus pure de toute la série. L'énergie est quasi totalement concentrée sur le fondamental

à **804.83 Hz**, avec une dynamique de **50 dB** par rapport au plancher de bruit. La forme triangulaire du signal garantit une quasi-absence d'harmoniques, contrairement au signal MLI rectangulaire

en sortie du MOSFET. C'est le comportement théoriquement attendu d'un condensateur dans un oscillateur NE555 en mode astable.

III.4.2. La tension de sortie du variateur de vitesse seul sans charge (Avec câble d'alimentation) :

III.4.2.1 Interprétation du signal temporel :

Dans le contexte d'un variateur de vitesse NE555 fonctionnant à vide, la courbe temporelle de la **figure III.6** confirme une commande MLI correcte. Le signal se présente sous la forme d'un train de créneaux périodiques, caractérisé par une alternance nette entre un niveau bas voisin de 0V et un niveau haut d'environ 10,5 V.

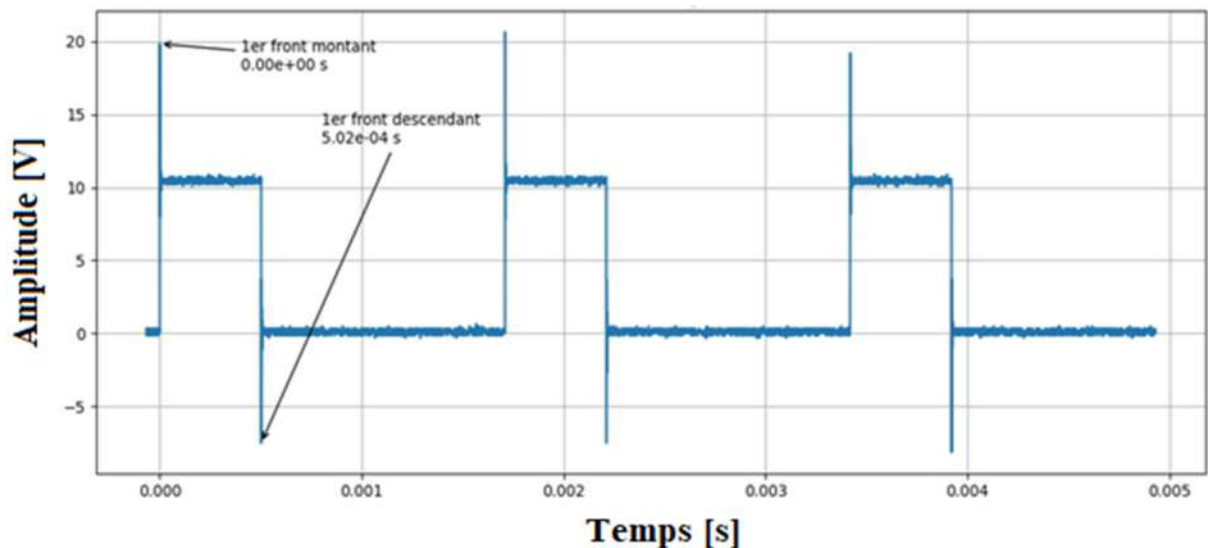


Figure III.6 : Réponse temporelle du signal de sortie de l'oscillateur à vide. (Avec câble d'alimentation)

Une description précise, front par front, permet de mettre en évidence les phénomènes parasites introduits par la ligne d'alimentation :

1. $t = 0,000$ s : On observe une transition brutale et quasi-instantanée de 0 V vers 10,5 V. Dès ce premier front, un pic de surtension immédiat culmine à **+20 V**. Ce phénomène est directement causé par l'inductance parasite du câble d'alimentation ; il constitue le pic positif le plus élevé de toute la série de mesures.

2. $t = 0$ à **0,502 ms :** La tension se stabilise à 10,6 V avec une légère ondulation résiduelle de 0,2 V. En l'absence de charge moteur, le MOSFET conduit en régime quasi-statique sans

consommation de courant significative. Le câble n'introduit donc aucune chute résistive visible, évitant ainsi la baisse progressive du plateau observée en configuration en charge.

3. $t = 5,02 \text{ e}^{-04} \text{ s}$: La transition est nette, passant de 10,5 V à 0 V. Elle est immédiatement suivie d'un sous-dépassement négatif très marqué atteignant -7 V (mesuré à -7,52 V sur certaines alternances). Au blocage du MOSFET, le courant circulant dans l'inductance du câble ($L_{\text{câble}}$) ne peut s'arrêter instantanément. Pour tenter de maintenir ce courant, la tension s'inverse selon la loi physique $= -L di/dt$. Comme le moteur est absent, ce pic négatif est purement attribuable aux caractéristiques inductives du câble d'alimentation.

4. Plateau LOW (de 0,502 ms à 1,75 ms) : La tension reste stable à 0 V avec un faible bruit résiduel de 0,1 V. L'absence de moteur élimine toute force contre-électromotrice (FCEM) ; le bruit observé provient uniquement d'un couplage capacitif au niveau du câble.

5. Cycles suivants : Ces transitoires de commutation se répètent de manière parfaitement identique à chaque période (Pic positif de +19 V à +20 V aux fronts montants et pic négatif de -7 V à -7,5 V aux fronts descendants).

Cette mesure démontre que **le câble d'alimentation seul**, même sans charge moteur, génère des surtensions systématiques à +20 V et des tensions négatives à -7 V à chaque commutation du MOSFET. C'est la configuration la plus sévère de toute la série. Le câble se comporte comme une inductance parasite pure qui amplifie tous les transitoires de commutation du MOSFET NE555. La priorité absolue est l'ajout d'un **condensateur de découplage** directement aux bornes d'alimentation du variateur.

III.4.2.2 Interprétation du spectre fréquentiel en dB :

Le spectre fréquentiel en dB montre un pic principal vers 600,36 Hz, fixé à 0 dB après normalisation la **Figure III.7**. Cette composante correspond à la fréquence fondamentale de répétition du signal MLI.

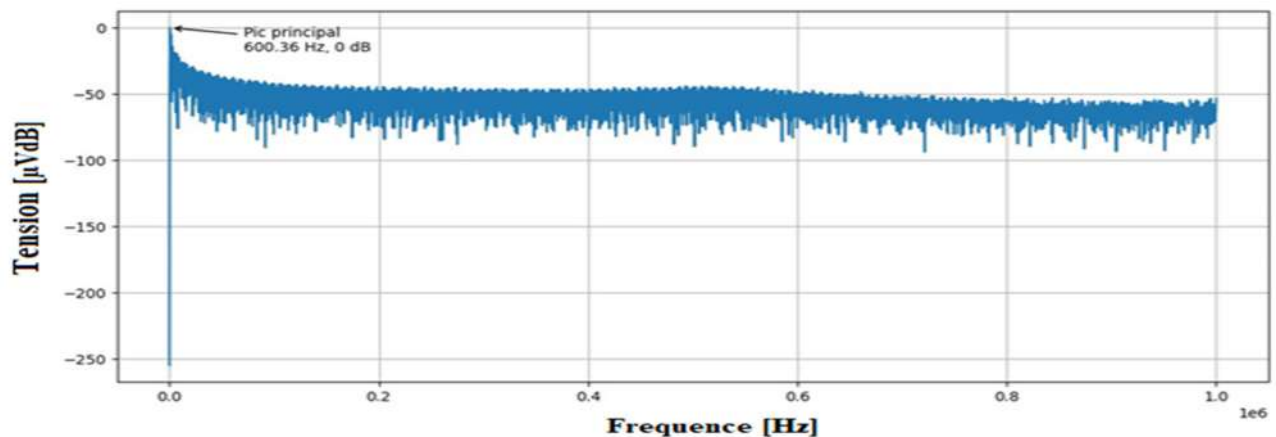


Figure III.7: Réponse fréquentielle du signal de sortie de l'oscillateur à vide. (Avec câble d'alimentation)

Le spectre fréquentiel en dB représenté sur la **figure III.7** (étendu ici jusqu'à 1 MHz) permet de cartographier la répartition énergétique de ces perturbations électriques. L'analyse zone par zone révèle les détails suivants :

1. Pic fondamental à 600.36 Hz — 0 dB :

Cette raie principale normalisée correspond à la fréquence de découpage du signal MLI généré par le NE555. La légère déviation par rapport aux autres configurations expérimentales (~ 1 kHz) s'explique par un infime repositionnement manuel du potentiomètre de réglage au cours de la campagne de mesures.

2. Descente verticale à -250 dB ($0 \rightarrow \sim 5$ kHz) :

Cette atténuation verticale correspond à la limite de la dynamique de calcul de l'analyseur (résolution de la FFT) et confirme que l'essentiel de l'énergie utile se concentre sur le fondamental. Le creux prononcé à 0 Hz résulte du retrait préalable de la composante continue afin d'isoler les composantes alternatives.

3. Plancher élevé et dense (5 kHz – 1 MHz) ≈ -50 dB :

C'est le résultat majeur introduit par le câble d'alimentation. Les impulsions temporelles très brèves et raides (pics de +20V / -7V) possèdent un contenu spectral intrinsèquement très large. Elles injectent de l'énergie sur l'ensemble du spectre, faisant remonter globalement le plancher de bruit à -50 dB.

4. Structure des creux profonds (-80 à -100 dB) :

On observe des **creux réguliers et profonds** répartis sur toute la plage.

5. Densification du spectre au-delà de 500 kHz :

Entre 500 kHz et 1 MHz, le spectre devient **plus dense et plus uniforme**, le niveau remonte légèrement vers -45 dB.

Cette courbe est la **plus révélatrice de toute la série**. En étendant la plage à 1 MHz, elle démontre que le câble d'alimentation transforme le variateur en **source de perturbations électromagnétiques large bande**. Le plancher à -50 dB sur 1 MHz entier, alimenté par les surtensions répétitives (+20V/-7V), constitue un **rayonnement parasite significatif**. Sans filtrage (ferrite + condensateur de découplage), ce montage ne respecte pas les normes CEM et peut interférer avec tout équipement électronique dans son environnement proche.

III.4.3. La tension de sortie du variateur de vitesse seul sans charge (Sans câble d'alimentation).

Lorsque le variateur est alimenté directement à la source sans l'intermédiaire du long câble d'alimentation, le signal mesuré sur la **figure III.8** présente les caractéristiques d'une onde MLI typique et assainie .

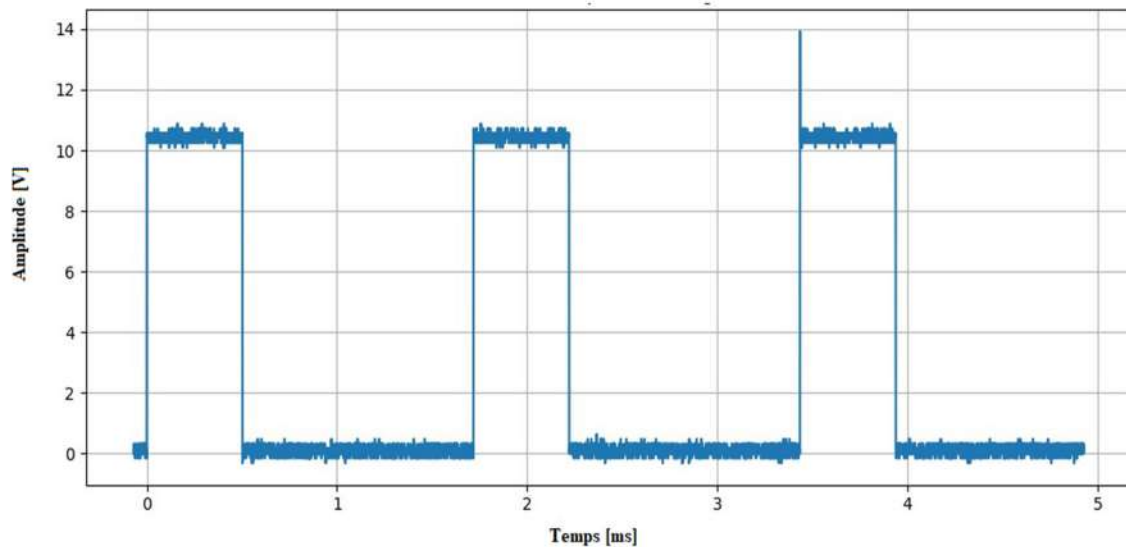


Figure III.8 : Réponse fréquentielle du signal de sortie de l'oscillateur à vide. (Avec câble d'alimentation)

Le signal est clairement **rectangulaire**, ce qui confirme le fonctionnement normal du NE555 en mode **astable** avec le MOSFET en commutation ON/OFF.

1. Niveau HIGH : ~ 10.5 V avec bruit superposé

Le plateau supérieur présente une tension stable mais superposée d'une légère ondulation de 0,3 V. Cette oscillation résiduelle provient des charges/décharges des capacités parasites internes du MOSFET (C_{iss} , C_{oss}) ainsi que d'infimes boucles LC induites par les pistes du circuit imprimé.

2. Niveau LOW : ≈ 0 V avec bruit visible

Le niveau bas est proche de zéro, perturbé uniquement par une agitation de ($\sim \pm 0.2$ V) liée à la résistance interne à l'état passant (R_{on}) du transistor et au bruit thermique haute fréquence.

3. Pic anormal à $t \approx 3.45$ ms $\rightarrow \sim 14$ V

C'est l'élément le plus critique de la courbe. Ce **pic de surtension** de ~ 14 V dépasse la tension d'alimentation (10.5 V) de **+33%**.

Le **tableau III.2** ci-dessous présente les principales causes probables de cette surtension ainsi que les mécanismes physiques associés.

Tableau III.2 : Causes des surtensions en commutation

Cause	Mécanisme
Surtension de commutation	À l'ouverture du MOSFET, l'énergie stockée dans L_{parasite} se libère : $V = L \times di/dt$
Effet Miller (Cgd)	Le couplage capacitif Gate-Drain injecte une impulsion sur le drain
Charge inductive	Si la charge (moteur) est inductive, le retour d'énergie crée un pic
Absence de diode de roue libre	Sans diode flyback, l'énergie inductive n'a pas de chemin de retour

Bien que les pics soient amortis par rapport à la configuration précédente (passant de +20 V à +14 V), la rapidité de commutation du MOSFET génère toujours des pointes de tension notables à vide, dues aux couplages capacitifs et inductifs intrinsèques de l'étage de puissance.

III.4.3.1. Interprétation de la courbe temporelle :

Le spectre associé de la **figure III.9** confirme la nature impulsionnelle du signal à travers une distribution d'énergie très structurée

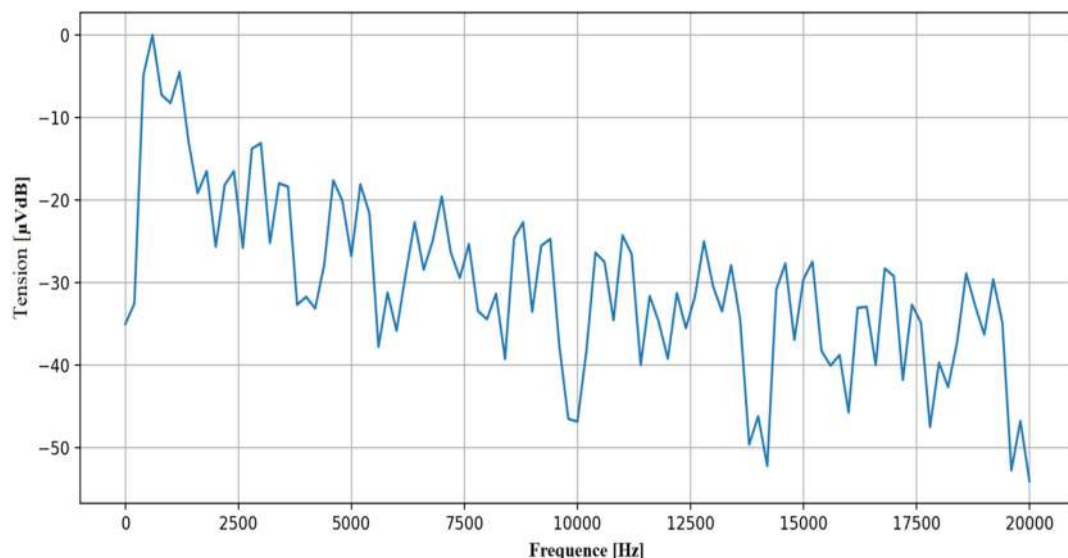


Figure III.9 : Réponse fréquentielle du signal de sortie de l'oscillateur sans charge (Sans câble d'alimentation).

Les interprétations sont comme suit :

1. Le pic à ~500–800 Hz

Elle correspond précisément à la fréquence fondamentale de découpage imposée par la cellule de temporisation du NE555. L'amplitude au sommet de cette raie traduit une conduction efficace de l'étage de puissance à sa fréquence de travail.

2. Les harmoniques (800 Hz → 10 kHz)

- Le MOSFET produit un signal de **forme quasi-rectangulaire** (commutation rapide)
- Un signal carré/PWM contient des **harmoniques impaires** : f , $3f$, $5f$, $7f$...
- Les ondulations régulières observées sur la courbe correspondent exactement à ces harmoniques de commutation

3. Le creux vers 9500–10 000 Hz

- Lié aux capacités parasites du MOSFET (C_{gs} , C_{ds} , C_{gd})
- Ces capacités forment avec les inductances du circuit des filtres LC parasites
- Phénomène de résonance/anti-résonance typique des circuits de commutation MOSFET

4. La chute au-delà de 10 kHz

- Les capacités de jonction du MOSFET (C_{iss} , C_{oss} , C_{rss}) agissent comme un filtre passe-bas naturel
- Plus la fréquence augmente, plus le MOSFET peine à commuter → atténuation croissante
- Comportement typique d'un filtre du 1er ou 2ème ordre

La **figure III.10** suivante présente la structure interne (Grille, Source, Drain, Substrat) et les capacités parasites d'un MOSFET.

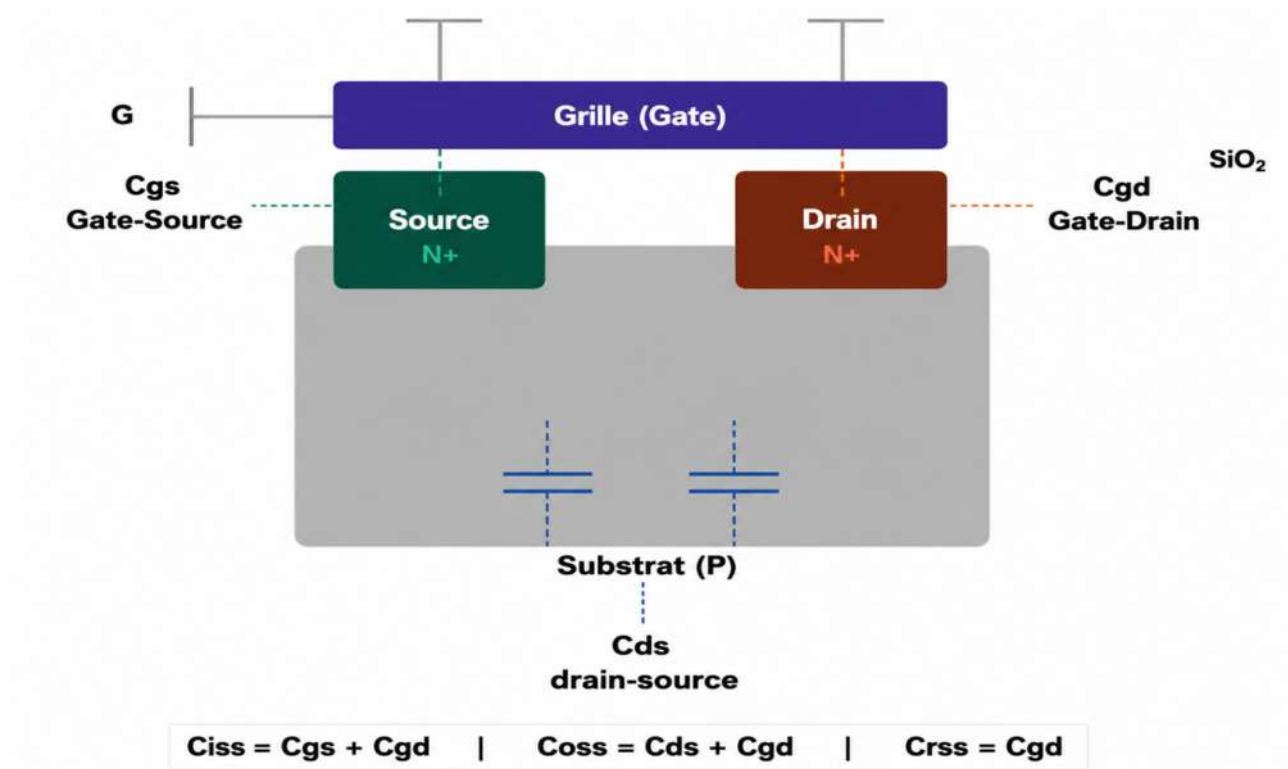


Figure III.10 : Représentation schématique des capacités internes d'un MOSFET.

C_{gs} — Capacité Grille-Source

C_{gd} — **Capacité Grille-Drain** (appelée aussi capacité de Miller)

C_{ds} — Capacité Drain-Source

C_{iss} = **C_{gs}** + **C_{gd}** Capacité d'entrée — pilote la vitesse de commutation

C_{oss} = **C_{ds}** + **C_{gd}** Capacité de sortie — énergie dissipée par cycle

C_{rss} = **C_{gd}** seul Capacité de transfert (Miller) — couplage G↔D

- **C_{iss}** limite la vitesse de commutation → atténuation progressive en haute fréquence
- **C_{rss} (Miller)** injecte du bruit depuis le drain vers la grille → harmoniques parasites visibles entre 5 et 15 kHz
- **C_{oss}** se charge/décharge à chaque cycle MLI → pertes d'énergie et résonances avec les inductances du circuit.

III.4.3.2. Interprétation du spectre fréquentiel en dB :

Le spectre fréquentiel en dB met en évidence la répartition de l'énergie du signal selon la fréquence. On observe une composante dominante dans les basses fréquences, autour de la fréquence fondamentale, ainsi que plusieurs harmoniques d'amplitude décroissante. Cette allure est caractéristique d'un signal périodique non sinusoïdal, ici de forme proche d'une impulsion rectangulaire.

La présence de plusieurs raies fréquentielles s'explique par le fait qu'un signal rectangulaire ne contient pas une seule fréquence, mais une somme de la fondamentale et de ses harmoniques. Plus la fréquence augmente, plus l'amplitude des composantes diminue, ce qui apparaît sur le graphe par une décroissance progressive du niveau en dB.

Le spectre montre également que l'essentiel de l'énergie du signal est concentré dans les premières composantes fréquentielles, tandis que les hautes fréquences correspondent surtout aux fronts rapides du signal et à de faibles composantes parasites. Cela confirme que le signal mesuré est un signal impulsionnel périodique avec une forme temporelle bien marquée.

L'expression en dB permet de mieux visualiser les composantes faibles du spectre et de comparer leurs niveaux par rapport à la composante principale. Ainsi, cette représentation met clairement en évidence la structure harmonique du signal et facilite l'analyse de sa qualité fréquentielle.

L'analyse fréquentielle en dB confirme que le signal étudié est de nature impulsionnelle périodique, riche en harmoniques, avec une énergie majoritairement concentrée autour de la fondamentale et de ses premières composantes.

III.4.3. La tension de sortie du variateur de vitesse en charge (Avec câble coaxial) :

Les figures III.11 et III.12 montre respectivement la réponse temporelle du variateur de vitesse en charge (Avec câble coaxial) et la réponse fréquentielle du même montage.

II.4.3.1. Interpretation temporelle :

1. Front montant — Pic de surtension (+13 à +16 V)

À chaque ouverture du MOSFET (transition LOW→HIGH), un **pic brutal** dépasse largement la tension d'alimentation.

A cause :

- Le câble ajoute une inductance $L_{\text{câble}}$ non négligeable
- Le moteur CC est fortement inductif (bobinages d'armature)
- Les deux en série amplifient massivement le phénomène par rapport à la mesure sans charge.

2. Tensions NÉGATIVES (−1 V à −6 V) — Phénomène nouveau et critique

C'est l'observation la plus alarmante. Des tensions **négatives** apparaissent sur la sortie, ce qui est **impossible** dans un circuit purement résistif.

Le **tableau III.3** suivant résume les principales causes de ce phénomène ainsi que les mécanismes associés.

Tableau III.3 : Causes combinées des surtensions dans une charge inductive :

Cause	Explication
Énergie magnétique du moteur	À la coupure, le moteur (inductance) tente de maintenir le courant → inverse la polarité
Absence de diode de roue libre	Sans diode flyback, l'énergie n'a pas de chemin → tension négative sur le drain
CEMF du moteur	La force contre-électromotrice du moteur en rotation s'ajoute au phénomène
Résonance $L_{\text{câble}} + C_{\text{parasite}}$	Le câble forme un circuit LC oscillant qui dépasse la masse

3. Plateau HIGH décroissant (~14 V → 8.5 V)

Contrairement à la courbe précédente où le plateau était **plat**, ici il **s'affaisse progressivement**.

4. Oscillations multiples sur le front descendant

Entre $t \approx 1.0$ et 1.7 ms, on observe **3 à 4 oscillations** avant stabilisation.

C'est une résonance LC amortie

L_{total} (câble + moteur) + C_{parasite} (MOSFET + câble) → fréquence de résonance :

$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \rightarrow$ amortissement progressif par R_{total} du circuit

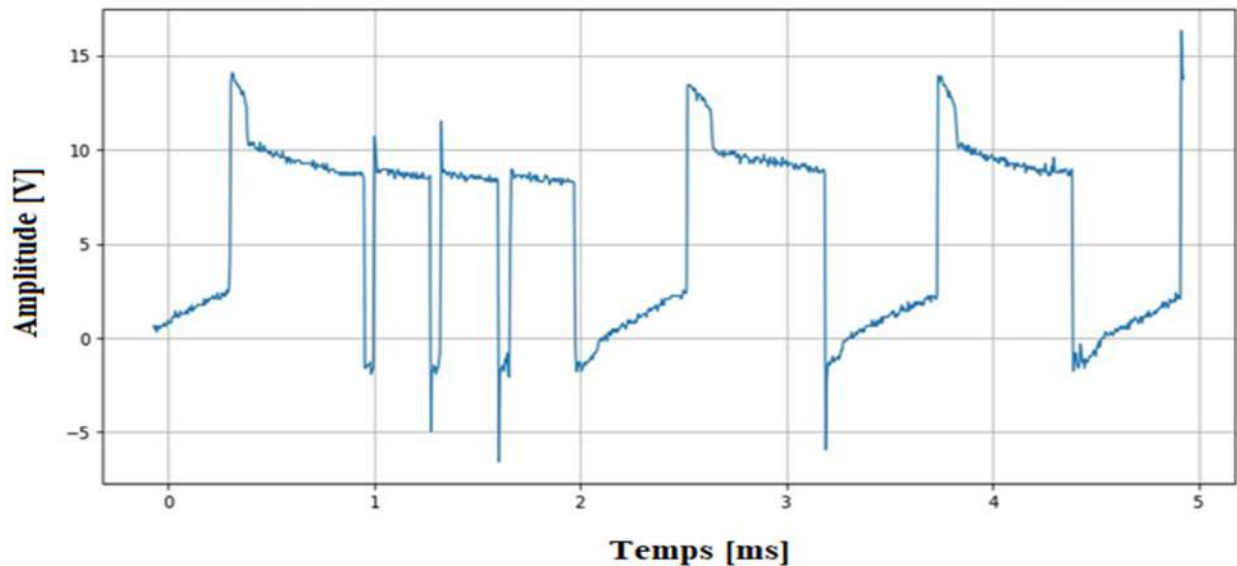


Figure III.11: Signal temporel du variateur MLI à bas de NE555 avec moteur CC en charge.

La **figure III.12** affiche la FFT du signal en charge après extraction de la composante continue, mettant en évidence les signatures fréquentielles de la charge couplée au câble coaxial

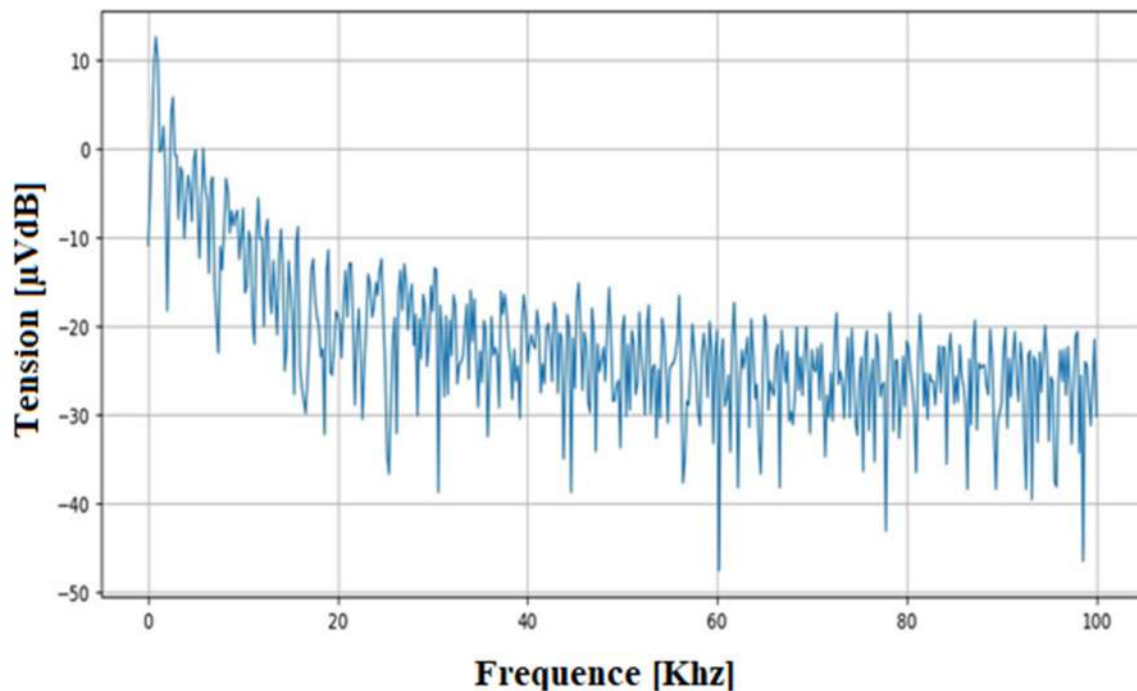


Figure III.12 : Spectre fréquentiel du signal MLI à bas de NE555 avec moteur CC en charge

1. Pic dominant à ~1 kHz (+12 μVdB) — Le plus fort de toutes les mesures

C'est le niveau le **plus élevé jamais mesuré** sur ce montage.

Causes combinées :

Le câble et le moteur forment ensemble un **circuit résonant LC** dont la fréquence propre tombe précisément dans la zone de travail du NE555 → **résonance constructive dangereuse**.

2. Plancher bruité relevé entre 20 et 100 kHz (≈ -15 à -25 dB)

Dans la courbe sans charge, le plancher descendait proprement vers $-40/-50$ dB au-delà de 10 kHz. Ici, le niveau reste **anormalement élevé** sur toute la plage 20–100 kHz.

3. Oscillations très denses et irrégulières (0 – 100 kHz)

La courbe est **beaucoup plus désordonnée** que la première mesure. Les oscillations sont rapprochées, irrégulières, et ne montrent plus les harmoniques ordonnées ($f, 3f, 5f...$) de la première mesure.

Le **moteur CC à balais** est une source de bruit électromagnétique particulièrement large bande à cause des micro-arcs aux balais.

4. Creux profonds multiples (-40 à -50 dB)

Contrairement à la courbe 1 qui avait un seul creux vers 10 kHz, ici on observe **plusieurs creux profonds** à ~ 60 kHz, ~ 80 kHz, ~ 97 kHz, ils sont des **interférences destructives multiples**

Conséquences pratiques :

- **Interférences électromagnétiques (EMI)** Le niveau élevé sur 0–100 kHz signifie que le montage **rayonne** des perturbations qui peuvent affecter d'autres équipements à proximité et peut poser des problèmes de conformité CEM.
- **Usure accélérée du MOSFET** Les résonances à haute fréquence génèrent des **pertes par commutation** supplémentaires → échauffement du MOSFET.

L'ajout du câble et du moteur CC **transforme radicalement** le profil spectral. Le pic à +12 dB et le plancher bruité élevé jusqu'à 100 kHz confirment que le système génère des **perturbations électromagnétiques significatives**. Sans filtrage, ce montage n'est pas viable dans un environnement avec d'autres équipements électroniques sensibles.

III.4.3.2. Interprétation fréquentielle :

III.4.4. La tension de sortie du variateur de vitesse en charge (Sans câble coaxial) :

Les **Figures III.13** et **III.14** montrent respectivement la réponse temporelle de la tension du variateur de vitesse en charge avec un moteur CC sans câble coaxial et la réponse fréquentielle du même montage.

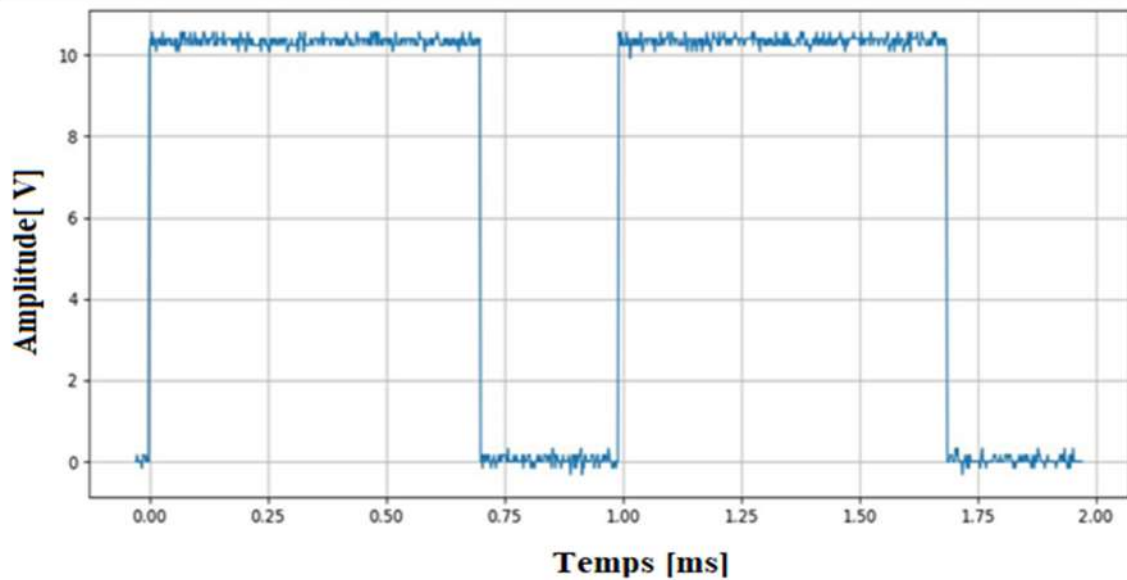


Figure III.13 : Réponse temporelle de la tension du variateur de vitesse en charge sans câble coaxial

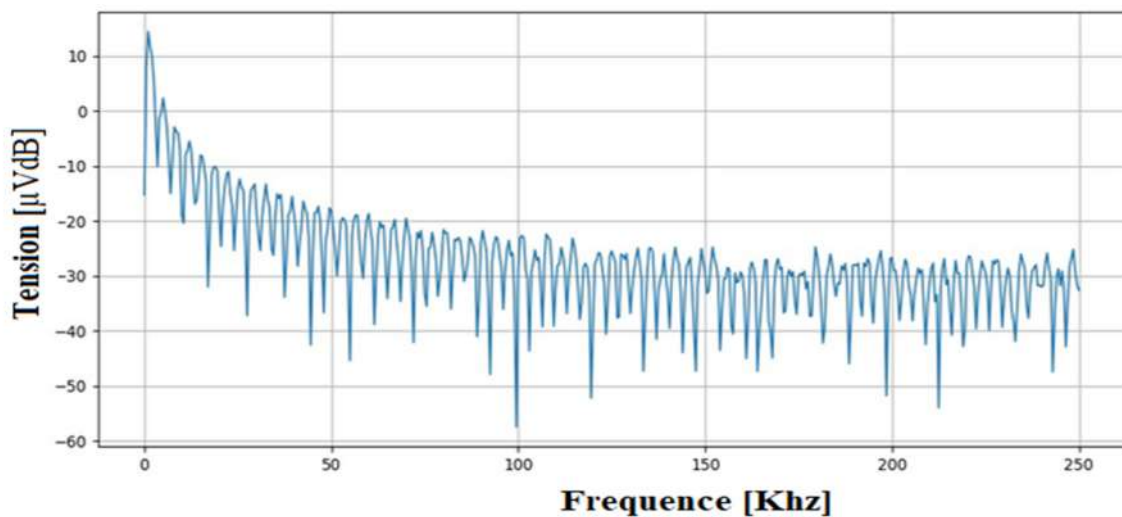


Figure III.14 : Réponse fréquentielle de la tension du variateur de vitesse en charge

III.4.4.1. Interprétation temporelle :

Description temporelle front par front :

1. $t = 0$ ms — Front montant (LOW $\rightarrow$ HIGH):

- La tension passe de 0 V à ~10.4 V de façon **quasi instantanée**
- Le front est **vertical et net**, sans dépassement ni oscillation
- **Aucune surtension** au-dessus de la tension d'alimentation
- Le MOSFET entre en **conduction franche** dès la commande

2. $t = 0$ à 0.70 ms — Plateau HIGH :

- Tension **stable et plate** à ~10.4 V pendant toute la durée t_{on}
- Légère ondulation résiduelle ± 0.2 V due aux balais du moteur et aux capacités parasites du MOSFET

- Le moteur reçoit la **tension pleine** → il accélère / maintient sa vitesse
- Tension moyenne appliquée au moteur

3. $t = 0.70 \text{ ms}$ — Front descendant (HIGH → LOW) :

- La tension chute de **10.4 V à 0 V** brutalement
- Front propre et sans rebond
- Le MOSFET se bloque → le courant dans le moteur cherche à continuer
- L'énergie magnétique du moteur se dissipe naturellement sans créer de pic visible
- Absence totale de tension négative → la liaison directe réduit suffisamment L_{parasite}

4. $t = 0.70 \text{ à } 1.0 \text{ ms}$ — Plateau LOW :

- Tension à $\approx 0 \text{ V}$ pendant $t_{\text{off}} = 0.30 \text{ ms}$
- Bruit résiduel très faible $\pm 0.1 \text{ V}$
- Le moteur décélère légèrement pendant cet intervalle
- La CEMF du moteur est absorbée sans remonter sur la sortie

5. $t = 1.0 \text{ ms}$ — Répétition du cycle :

- Le cycle se reproduit identique à chaque période
- Signal parfaitement périodique et stable → régime établi

Cette courbe représente le **fonctionnement optimal** du variateur NE555 + MOSFET. Le signal MLI est propre, stable, et fidèlement transmis au moteur DC. C'est la configuration de **référence idéale** à atteindre dans la conception finale du variateur.

III.4.4.2. Interprétation fréquentielle :

Le spectre de la **figure III.14** montre les fréquences contenues dans le signal MLI.

1. Pic dominant à $\sim 1 \text{ kHz}$ (+14 μVdB) — Maximum absolu :

Le pic est encore plus élevé qu'avec le câble (+12 μVdB), ce qui peut sembler paradoxal.

Liaison directe : Pas d'atténuation du fondamental → pic plus net et plus haut → mais harmoniques PLUS propres.

La liaison directe **concentre l'énergie** sur la fréquence fondamentale et ses harmoniques au lieu de la disperser en bruit large bande.

2. Structure harmonique régulière et périodique :

C'est la caractéristique la plus remarquable de cette courbe. On observe des **oscillations régulièrement espacées** sur toute la plage 0–250 kHz, contrairement à la courbe précédente.

La présence d'harmoniques jusqu'à **250 kHz** est la signature directe des **fronts raides** du MOSFET en commutation.

3. Décroissance ordonnée — Pente $\sim 20 \text{ dB/décade}$:

La tendance générale suit une **pente régulière** de +14 dB vers –30 dB sur toute la plage.

Courbe mesurée ≈ -20 dB/décade $\rightarrow$ comportement quasi-idéal $\rightarrow$ le MOSFET commute proprement $\rightarrow$ la liaison directe ne déforme pas le spectre.

Cette pente régulière confirme un **fonctionnement sain** du variateur.

4. Creux profonds réguliers (-45 à -55 dB) :

On observe des creux périodiques très marqués à ~ 50 kHz, ~ 100 kHz, ~ 210 kHz.

Ces creux sont donc **mathématiquement prévisibles**.

5. Plancher résiduel entre -25 et -35 dB (20–250 kHz) :

Un plancher de bruit persiste malgré la liaison directe.

Cette courbe fréquentielle est la **plus structurée et la plus propre** de la série. La liaison directe préserve la **nature harmonique ordonnée** du signal MLI généré par le NE555. Le spectre suit fidèlement la théorie d'un signal rectangulaire avec une pente de -20 dB/décade et des zéros prévisibles liés au rapport cyclique. C'est le **spectre de référence** du variateur fonctionnant dans ses conditions optimales, sans perturbations liées au câblage.

Conclusion :

Ce travail a permis de confirmer de manière satisfaisante le bon fonctionnement et la performance d'un variateur de vitesse pour moteur à courant continu, basé sur le circuit intégré NE555. L'étude a démontré que la vitesse de rotation du moteur dépend directement de la valeur moyenne de la tension hachée, laquelle peut être réglée manuellement via un potentiomètre agissant sur le rapport cyclique du signal MLI.

Les essais expérimentaux, réalisés selon plusieurs configurations, ont permis de mieux comprendre le comportement global du système. À vide, le circuit produit un signal MLI stable, avec une fréquence comprise entre environ 600 Hz et 805 Hz, bien que des transitoires importants et des pics de commutation apparaissent en raison de l'absence de charge et des effets parasites.

En présence du moteur, la nature inductive de celui-ci modifie sensiblement les formes d'onde. L'utilisation de câbles d'alimentation, qu'ils soient classiques ou coaxiaux, engendre des surtensions négatives significatives (atteignant $-6,56$ V) ainsi que des pics transitoires élevés, dus aux inductances internes du moteur et aux impédances parasites des connexions.

En revanche, une connexion directe sans câble améliore nettement les performances : le signal MLI devient plus propre, les surtensions inverses sont fortement réduites (environ $-0,32$ V), traduisant une meilleure stabilité du montage et un amortissement efficace, notamment grâce au rôle de la diode de roue libre.

Enfin, l'analyse fréquentielle par FFT a confirmé les observations temporelles en mettant en évidence la richesse harmonique des signaux rectangulaires, tout en montrant que l'énergie reste majoritairement concentrée autour de la fréquence fondamentale de commutation (proche de 1 kHz en charge directe).

Ainsi, ce montage se révèle être une solution simple, fiable et bien adaptée aux applications pédagogiques ainsi qu'aux systèmes embarqués de faible à moyenne puissance nécessitant un contrôle efficace de la vitesse

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'analyse expérimentale des champs électromagnétiques générés par un variateur de vitesse basé sur la modulation de largeur d'impulsion (MLI), commandé par un circuit NE555. Elle vise à identifier les sources des perturbations électromagnétiques, à analyser leurs modes de propagation, notamment en conduction, ainsi qu'à proposer des solutions permettant d'améliorer la compatibilité électromagnétique (CEM).

Les résultats expérimentaux ont montré que le système étudié constitue une source significative de perturbations électromagnétiques. Celles-ci sont principalement dues aux commutations rapides des composants de puissance, entraînant des variations importantes de tension et de courant (dv/dt et di/dt). L'étude a également mis en évidence des perturbations conduites se propageant à travers les conducteurs d'alimentation et de commande, avec une influence notable de la fréquence de découpage sur leur amplitude.

L'expérimentation a confirmé que le front montant du signal MLI, caractérisé par un fort dv/dt , constitue la principale source de bruit de mode commun, tandis que les appels de courant lors de la conduction du MOSFET influencent principalement les perturbations en mode différentiel.

L'analyse comparative des signaux a permis de mettre en évidence l'impact de la charge inductive sur le comportement spectral du système. Alors que les mesures à vide révèlent un spectre relativement propre centré sur la fréquence fondamentale du NE555 (environ 600 Hz), l'introduction du moteur à courant continu génère des harmoniques supplémentaires ainsi que des oscillations haute fréquence plus marquées. Cette différence s'explique par l'interaction entre les commutations du MOSFET et l'inductance du moteur, confirmant que la charge constitue un facteur aggravant des perturbations électromagnétiques.

La comparaison entre les résultats expérimentaux a révélé une bonne cohérence globale. Les phénomènes observés sont conformes aux principes fondamentaux de la CEM décrits dans la littérature, bien que certaines divergences mineures subsistent en raison des limites des instruments de mesure et des conditions expérimentales.

Afin de réduire ces perturbations, plusieurs solutions ont été proposées, notamment l'optimisation du câblage et le blindage des conducteurs. S'y ajoute l'emploi de réseaux d'amortissement qui sont des circuits de protection passifs constitués d'une résistance et d'un condensateur. Ces dispositifs sont placés au niveau des composants de puissance afin de limiter les surtensions, d'atténuer les oscillations parasites et de réduire les fortes variations de tension et de courant (dv/dt et di/dt) lors des commutations.

Conclusion générale

Des solutions d'amélioration de la disposition des conducteurs ont été proposées afin de réduire significativement le niveau des perturbations conduites et d'améliorer le comportement global de compatibilité électromagnétique (CEM) du système.

Ce travail a permis de renforcer la compréhension des phénomènes de compatibilité électromagnétique dans les systèmes d'électronique de puissance et de mettre en évidence le lien entre l'approche théorique et l'étude expérimentale.

Il a également permis de développer une méthodologie d'analyse basée sur l'observation des signaux temporels et fréquentiels, offrant une meilleure interprétation des mécanismes de génération et de propagation des perturbations électromagnétiques.

Enfin, plusieurs perspectives peuvent être envisagées, telles que l'utilisation de systèmes de commande plus avancés (microcontrôleurs ou DSP), l'étude des perturbations rayonnées à l'aide d'équipements spécialisés.

Une perspective intéressante consisterait également à intégrer un plan de masse optimisé et à étudier l'influence des temps de commutation (rise/fall time) du transistor sur le niveau des émissions conduites au-delà de 30 MHz.

Les objectifs fixés au début de ce travail ont été globalement atteints, et les résultats obtenus constituent une base intéressante pour des études plus approfondies dans le domaine de la compatibilité électromagnétique appliquée aux systèmes d'électronique de puissance.

Bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications, 4th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2014.
- [2] B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.
- [3] International Electrotechnical Commission, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-4: Generic standards – Emission standard for industrial environments, IEC 61000-6-4, 2018.
- [4] C. R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, 2nd ed., Wiley, 2006.
- [5] H. W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, Wiley, 2009.
- [6] Texas Instruments, NE555 Timer Datasheet, 2015.
- [7] IEC 60050, International Electrotechnical Vocabulary – EMC, 2011.
- [8] A. Mariscotti, “Critical Review of EMC Standards for the Measurement of Radiated Electromagnetic Emissions,” Energies, vol. 14, no. 3, p. 759, 2021.
- [9] D. K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley, 1989.
- [10] Balanis, C. A., Advanced Engineering Electromagnetics, Wiley, 2012.
- [11] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, Wiley, 1998
- [12] D. J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics, 4th ed., Pearson, 2013.
- [13] ITU, Radio Regulations, International Telecommunication Union, 2020.
- [14] F. Ulaby and U. Ravaioli, Fundamentals of Applied Electromagnetics, 7th ed., Boston, MA, USA: Pearson, 2015.
- [15] F. Gardiol, Compatibilité électromagnétique, Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2003.
- [16] IEC 61000-4-3, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test, IEC, 2020.
- [17] IEEE Std 299-2006, IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures, IEEE, 2006.
- [18] IEC 61000-2-1, Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2-1: Environment — Description of the environment — Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems.]
- [19] F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 3rd ed. Springer, 2016.
- [20] NASA, “Solar Flares and Space Weather.”
- [21] M. Bothmer and I. A. Daglis, Space Weather: Physics and Effects, Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [22] M. A. Uman, The Lightning Discharge. Dover, 2001.
- [23] V. A. Rakov and M. A. Uman, Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003.
- [24] P. S. Cannon et al., “Extreme space weather: impacts on engineered systems,” 2013.
- [25] M. N. O. Sadiku, Elements of Electromagnetics, 6th ed. Oxford University Press, 2014.
- [26] M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices and Applications, 4th ed., Pearson, 2014.
- [27] Livre : Williams, T. (2016). EMC for Product Designers (5^e éd.). Oxford : Newnes.
- [28] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed., Wiley, 2003.
- [29] Tesche, F. M., Ianoz, M. V., & Karlsson, T. (1997). EMC Analysis Methods and Computational Models. New York, États-Unis : John Wiley & Sons.

- [30] H. Slimani, " Estimation des Perturbations Conduites et Rayonnées dans les Câbles de Puissance ", Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université de Sidi Bel-Abbès, 2016.
- [31] International Electrotechnical Commission, IEC 61000-4-3: Radiated Immunity Test, 2020.
- [32] F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson, EMC Analysis Methods and Computational Models. New York, NY, USA: Wiley, 1997.
- [33] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd ed. New York, NY, USA: IEEE Press, 2000.
- [34] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [35] E. C. Brady and W. A. Radasky, *Field Effects Handbook, Volume 3: Protection*, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006.
- [36] S. Y. Zhang and J. L. Drewniak, "Radiated emission coupling mechanisms and prediction techniques," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 4, pp. 786–798, Nov. 2005.
- [37] International Electrotechnical Commission, IEC 61000-6-4: Emission Standard for Industrial Environments, 2018.
- [38] S. Y. Zhang and J. L. Drewniak, "Coupling mechanisms for conducted EMI and mitigation techniques," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 3, pp. 543–552, Aug. 2006.
- [39] E. C. Brady and W. A. Radasky, *Field Effects Handbook, Volume 3: Protection*, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006.
- [40] J. F. de Oliveira, P. Ribeiro, and L. M. Ferreira, "EMC issues in variable speed drives: conducted and radiated emissions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4496–4503, Nov. 2009.
- [41] IEC, IEC/EN 61800-3: Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2017.
- [42] CISPR 11, Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment – Electromagnetic disturbance characteristics – Limits and methods of measurement, International Special Committee on Radio Interference, 2015.
- [43] IEC 61000-4-2, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test, International Electrotechnical Commission, 2008.
- [44] IEC 61000-4-3, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test, International Electrotechnical Commission, 2006.
- [45] Revista Española de Electrónica, Techniques de blindage électromagnétique, 2022
- [46] IEC 60228:2021 et IEC 61000-5-2:2014.
- [47] Généré par assistant IA (OpenAI, 2026) à partir d'un schéma pédagogique sur la mise à la terre.
- [48] F. Rachidi, "Blindage", Notes de cours, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFLDE-LRE CH- 1015 Lausanne, 12 Mai 2014 .
- [49] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, McGraw-Hill, 5th Edition, 2012.
- [50] Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, 2002.
- [51] M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices and Applications, Pearson, 4th Edition, 2014

Bibliographiques

- [52] R. Krishnan, Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall, 2001.
- [53] N. Mohan, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, Wiley, 2003.
- [54] Projet de fin d'étude Thème « Elaboration d'un système de contrôle et de commande d'une unité de recyclage de sable de moulage ».
- [55] Livre de base en physique et en génie électrique.
- [56] L. Couffignal «Le moteur à courant continu», cours, 2006.
- [57] Ouvrages de "technologie automobile" ou de maintenance industrielle"
- [58] Electric Machinery Fundamentals Stephen J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, 5th Edition, McGraw-Hill, 2011.
- [59] Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering (5th Edition). Prentice Hall.
- [60] ouvrages sur les "machines électriques" (Electric Machines)
- [61] Rashid, M. H. (2011). Power Electronics: Circuits, Devices and Applications (4th Edition). Pear
- [62] ouvrages intitulé « Variateurs de vitesse pour moteurs à courant alternatif » de l'auteur Jean Bonal
- [63] A. Hughes and B. Drury, Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications, 4th ed. Oxford, UK: Newnes/Elsevier, 2013.
- Source utile pour expliquer les moteurs électriques, les entraînements électriques et la variation de vitesse des moteurs à courant continu. Le livre traite des moteurs conventionnels et brushless DC ainsi que des systèmes d'entraînement.
- [64] M. H. Rashid, Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications, 4th ed. Boston, MA, USA: Pearson Education, 2014.
- Source utile pour la partie électronique de puissance : hacheurs, commutation, transistors de puissance, commande par découpage et conversion d'énergie.
- [65] Microchip Technology Inc., DC Motor Control Tips 'n Tricks, Chapter 5, 2008.
- Source très utile pour expliquer les circuits de commande de moteurs DC, les étages de puissance et les techniques de commande appliquées aux moteurs à courant continu.
- [66] Texas Instruments, NE555, SA555, SE555 Precision Timers Datasheet, 2026.
- Source constructeur à citer pour le fonctionnement du NE555. La fiche technique précise que le NE555 peut fonctionner en mode astable et que la fréquence ainsi que le rapport cyclique peuvent être contrôlés par des composants externes RRR et CCC.
- [67] Texas Instruments, LM555 Timer Datasheet, 2025.
- Source complémentaire pour expliquer le fonctionnement du timer 555 en oscillateur astable, où la fréquence et le rapport cyclique sont réglés à l'aide de deux résistances et d'un condensateur.
- [68] Nexperia, Using Power MOSFETs in DC Motor Control Applications, Interactive Application

Bibliographiques

Note, 2021. Source utile pour justifier l'utilisation des MOSFETs comme interrupteurs électroniques dans la commande des moteurs DC par PWM.

[69] Diotec Semiconductor, Free-Wheeling Diodes for Inductive-Load Switches in Motors and Relays, Application Note, 2016. Source utile pour expliquer le rôle de la diode de roue libre dans les charges inductives comme les moteurs et les relais.

[70] Electronics Tutorials, "Pulse Width Modulation Used for Motor Control Applications," 2013. Source pédagogique pour expliquer simplement la PWM, le rapport cyclique et l'effet de la variation de largeur d'impulsion sur la vitesse d'un moteur DC.

[71] cours d'électronique de puissance, 'commande des convertisseurs statiques: modulation de largeur d'impulsion interactive'

[72] Robert Boylestad, Electronic Devices and Circuit Theory, chapter : Operational

Amplifiers (Comparators)

[73] Schneider Electric, "Variateurs de vitesse : Cahier technique n° 208," Collection Technique Schneider Electric, pp. 4-6, 2005.

[74] J. W. Valvano, Embedded Systems: Introduction to Arm Cortex-M Microcontrollers. North Charleston, SC, USA : CreateSpace, 2012.

[75] M. H. Rashid, éd., Power Electronics Handbook, 4e éd. Oxford, Royaume-Uni : Butterworth-Heinemann, 2017.

[76] NE555 Texas Instruments, NE555 Timer Datasheet, 2015. [Online]. Available: <https://www.ti.com>

[77] Texas Instruments, "NA555, NE555, SA555, SE555 Precision Timers," Datasheet SLFS048I, revised Sept. 2014, pp. 9-11. [En ligne]. Disponible : <https://www.ti.com>.

[78] R. W. Erickson and D. Maksimović, Fundamentals of Power Electronics, 2nd ed. Boston, MA, USA: Springer, 2001

Résumé

Ce travail présente l'analyse expérimentale des perturbations électromagnétiques induites par un variateur de vitesse MLI pour moteur à courant continu, commandé par un circuit NE555. L'étude s'articule autour de la conception du prototype et de la mesure des perturbations conduites générées lors des commutations rapides des composants. Les résultats démontrent que les fortes variations de tension (dv/dt) et de courant (di/dt) constituent la source principale des interférences. Enfin, l'efficacité de plusieurs techniques de réduction (filtres EMI, optimisation du câblage et blindage) est validée pour mettre le système en conformité avec les exigences de la compatibilité électromagnétique (CEM).

Mots-clés: Compatibilité électromagnétique (CEM), Variateur de vitesse, NE555, Émissions conduites.

Abstract

This study presents an experimental analysis of electromagnetic interference (EMI) generated by a PWM speed controller for a DC motor, driven by an NE555 integrated circuit. The work focuses on designing the prototype and measuring the conducted emissions produced during the fast switching of power electronic components. The experimental results demonstrate that high voltage (dv/dt) and current (di/dt) variations are the primary sources of interference. Finally, the effectiveness of several mitigation techniques—including EMI filters, wiring optimization, and shielding—is validated to improve the system's electromagnetic compatibility (EMC).

Key words: Electromagnetic Compatibility (EMC), Speed controller, NE555, Conducted emissions.

ملخص

تتناول هذه الدراسة التحليل التجريبي للانبعاثات الكهرومغناطيسية الناتجة عن مغير سرعة محكوم بتقنية تعديل عرض يركز العمل على تصميم النموذج الأولي وقياس الاضطرابات. لمحرك تيار مستمر، والمبني حول الدائرة المتكاملة النبضة الناتجة عن التبديل السريع للمكونات الإلكترونية. وقد أظهرت النتائج التجريبية أن التغيرات السريعة في الجهد المنقولة تشكل المصدر الرئيسي لهذه التداخلات. في الختام، تم إثبات فعالية عدة تقنيات للحد من هذه الاضطرابات، لا سيما والتيار استخدام مرشحات التداخل الكهرومغناطيسي، تحسين الأسلاك، والدرع، مما يساهم في تحسين أداء التوافق للنظام الكهرومغناطيسي.

كلمات مفتاحية : التوافق الكهرومغناطيسي , مغير السرعة , الاضطرابات المنقولة