

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté De Génie Electrique et d'Informatique
Département de génie biomédical



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en
Génie Biomédical
Spécialité : Instrumentation Biomédicale

Présentée par :

- LALLALI Akila
- BANDOUCISSAM

**Etude et réalisation d'un neurostimulation électrique transcutané à
impulsion sinusoïdale**

Soutenu publiquement, le 03/ 07 / 2025, devant le jury composé de :

Dr. Nouredine BOURKACHE	MCB	UMMTO	Président
Dr. Cherif MEDDOUR	MCB	UMMTO	Examineur
Dr. Samy Hassani OULD OUALI	MCB	UMMTO	Promoteur
Dr. Farid HOCINI	MCB	UMMTO	Co-Promoteur

Année Universitaire : 2024-2025

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre I : Généralités sur l'électrothérapie	
Introduction	4
Partie 1 : Généralités sur les muscles et les nerfs	4
1.1 La douleur	4
1.1.1 Types de douleurs	5
1.1.2 Mécanismes physiopathologiques	5
1.1.3 Transmission et modulation	6
1.2 Les muscle	6
1.2.1 Propriétés	7
1.2.2 Structure du muscle squelettique	7
1.3 Anatomie des nerfs	8
1.3.1 Structure générale	8
1.3.2 Types de fibres nerveuses	8
1.3.3 Rôle fonctionnel	9
Partie 02 :L'électrothérapie	9
2.1 Kinésithérapie / Physiothérapie	9
2.2 Définition de l'électrothérapie	10
2.3 La TENS (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation)	11
2.3.1 Indications	11
2.3.2 Contre-indications	12
2.3.3 Avantages	12
2.3.4 Effets secondaires	13
2.3.5 Types d'appareils	13
2.3.6 Accessoires	15
2.3.7 Paramètres principaux	16
2.3.8 Modes d'utilisations	17
2.4 Les électrodes	19
2.4.1 Choix des électrodes	19

2.4.2	Techniques de placement	20
2.5	Les brûlures électriques	21
2.5.1	Types de brûlures	21
	Conclusion	22

Chapitre II : Conception et traitement du signal dans le Système TENS

	Introduction	24
2.1	Matériel utilisé	24
2.1.1	Carte ESP32	24
2.1.2	IDE Arduino	25
2.1.3	Génération du signal sinusoïdal	26
2.1.4	Paramètres du signal	27
2.2	Organigramme du programme	28
2.3	Amplification du signal	30
2.4	Filtrage de la composante continue	31
	Conclusion	32

Chapitre III : Application et discussion des résultats

	Introduction	34
3.1	Visualisation du signal	34
3.1.1.	Commande ON/OFF et adaptation du signal pour la stimulation TENS.....	34
3.1.2	Variation de la fréquence	36
3.1.3	Variation du temps d'application	37
3.1.4	Variation du temps de traitement	38
3.2	Discussion des résultats	39
	Conclusion	39
	Conclusion générale	41

Table des figures

Figure 1.1 : Les muscles du corps humain (vues antérieure et postérieure).....	06
Figure 1.2 : Structure du musclessquelettique.....	07
Figure 1.3 : Premier appareil d'électrothérapie.....	10
Figure 1.4 : Appareil d'électrothérapie.....	11
Figure 1.5 : Appareil TENS Standard.....	13
Figure 1.6 : Appareil TENS Numérique.....	14
Figure 1.7 : TENS Sans Fil.....	14
Figure 1.8 : Appareil TENS combinés.....	15
Figure 1.9 : Accessoires d'appareils TENS.....	15
Figure 2.1 : Brochage de la carte ESP32.....	24
Figure 2.2 : IDE Arduino.....	25
Figure 2.3 : Signal sinusoïdal obtenu.....	26
Figure 2.4 : Circuit de commande.....	27
Figure 2.5: Organigramme fonctionnelle.....	28
Figure 2.6 : Circuit d'amplification.....	30
Figure 2.7 : Signal sinusoïdal après amplification.....	30
Figure 2.8 : Circuit de filtre passe-haut.....	31
Figure 2.9 : Signal sinusoïdal après filtrage.....	31
Figure 3.1 : Signal affiché après appui sur le bouton ON.....	34
Figure 3.2 : Signal désactivé.....	34
Figure 3.3 : Amélioration du signal DAC par amplification et filtrage.....	35
Figure 3.4 : Variation de la période du signal lors de la diminution de la fréquence.....	36
Figure 3.5 : Variation de la période du signal lors d'augmentation de la fréquence.....	36
Figure3.5 : Signal affiché après l'augmentation de la fréquence après la diminution.....	37
Figure 3.7 : Augmentation du temps d'application.....	37
Figure 3.8 : Diminution du temps d'application.....	38
Figure 3.9: variation du temps de traitement.....	38

Remerciements

C'est avec un profond sentiment de gratitude que nous saisissons cette occasion pour remercier sincèrement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nous remercions chaleureusement nos encadrants Mr. Samy Hassani OULD OUALI et Mr Farid HOCINI, pour leur disponibilité, orientations, accompagnement attentif et leurs précieux conseils tout au long de ce projet.

Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury pour l'attention portée à ce mémoire ainsi que pour le temps et l'intérêt qu'ils lui ont accordés.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du département de Génie Biomédical de l'UMMTO pour leur encadrement tout au long de notre parcours.

Nous remercions particulièrement Dr Abbes, pour sa bienveillance, son écoute et sa disponibilité.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À la mémoire de ma chère maman Malika.

Ton absence est une douleur constante, mais ton amour reste ma lumière. Ce travail, je te le dédie du fond du cœur. Qu'Allah t'accorde Son paradis.

À mon père Amar.

Merci pour ta force, ton soutien et ton amour inconditionnel. Tu es l'exemple de la patience et du courage.

À mes précieuses sœurs Salima et Karima.

Vous êtes mon pilier. Merci d'avoir toujours cru en moi dans les bons comme dans les moments difficiles.

À Tata Djamila.

À Amina, une étoile bienveillante dans mon ciel, merci pour ta lumière. et à ta maman Tata Fatima, pour sa tendresse, sa force et tout l'amour qu'elle inspire.

À mes copines Lina, Sarah, Votre amitié a rendu cette aventure plus douce, vos encouragements ont toujours été un réconfort.

À Sabrina, Melissa, Chahinez, Lydia et Saida pour avoir mis du soleil dans chaque jour d'étude

Et à ma binôme et ma copine Wissam et sa famille.

Akila

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mon père pour son soutien, ses conseils et sa présence à chaque étape

À ma mère, celle qui a toujours été à mes côtés dans les bons et les mauvais moments, qui m'a donné la force d'aller jusqu'au bout.

À mes sœurs, Lila et Radia éloignées par les kilomètres mais si proches par le cœur votre tendresse traverse la distance, vos pensées me réconfortent malgré l'absence ainsi que mes beaux-frères Ali et Lounis .

À mon frère Nassim et sa femme Eve qui m'ont toujours soutenue.

À mes trésors ,Noham, Liham et Noa et à ma princesse Janna.

À ma copine Dalia, je t'offre ce mémoire en hommage merci pour ton amour et ton soutien, ton absence restera une blessure qui ne se refermera jamais.

Et à ma binôme et amie Akila ainsi qu'à sa famille.

Wissam

Introduction générale

Introduction générale

La douleur est l'un des motifs de consultation les plus fréquents en milieu médical, affectant considérablement la qualité de vie des patients. Parmi les solutions non médicamenteuses proposées pour soulager les patients est l'électrothérapie, et plus précisément la stimulation électrique transcutanée des nerfs (TENS), qui occupe une place de choix grâce à son efficacité, sa simplicité d'utilisation et son caractère non invasif.

La technique TENS repose sur l'application de courants électriques de faible intensité à travers la peau, dans le but de moduler la transmission des signaux douloureux au niveau nerveux. Cette méthode, largement utilisée en kinésithérapie et en rééducation fonctionnelle, s'appuie sur des connaissances précises en neurophysiologie et en anatomie, notamment concernant les fibres nerveuses impliquées dans la perception de la douleur.

Dans ce contexte, notre projet a pour objectif la conception et la réalisation d'un dispositif TENS, capable de générer un signal sinusoïdal contrôlable et adapté à l'usage thérapeutique. Ce signal passe par des étapes d'amplification et de filtrage afin d'en optimiser les caractéristiques avant application. Une interface utilisateur permet de régler les paramètres de stimulation, tels que la fréquence, le temps d'application, le temps de repos et le temps de traitement.

Ce mémoire est structuré en trois parties principales :

Le premier chapitre présente les généralités sur l'électrothérapie, ses applications médicales, ainsi que les bases anatomiques et physiologiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement du TENS.

Le deuxième chapitre est dédié à la conception matérielle et logicielle du système, incluant l'organigramme fonctionnel, le schéma de génération et de traitement du signal, ainsi que les paramètres modulables.

Le troisième chapitre décrit la réalisation du système, la visualisation des signaux obtenus, et leur analyse, afin d'évaluer l'efficacité de la solution proposée.

CHAPITRE I :
Généralité sur L'électrothérapie

Introduction

L'électrothérapie est une technique de soin utilisée en rééducation fonctionnelle, en kinésithérapie et en médecine physique. Elle consiste à appliquer des courants électriques à visée thérapeutique. Parmi ses différentes formes, la stimulation électrique transcutanée (TENS) est largement utilisée pour le soulagement de la douleur. Elle repose sur le principe de stimulation des nerfs à travers la peau, dans le but d'interrompre ou de moduler les signaux douloureux transmis au système nerveux central.

Pour comprendre les effets et les applications de la TENS, il est essentiel de s'appuyer sur des connaissances solides en anatomie et en physiologie humaine. En effet, la stimulation électrique agit directement sur les nerfs périphériques, transmetteurs de l'influx nerveux, et peut également affecter les muscles squelettiques, en provoquant ou en modulant leur contraction. Par ailleurs, la perception de la douleur, cible principale de la TENS, implique des circuits nerveux complexes qu'il est nécessaire de connaître pour comprendre le fonctionnement du dispositif.

Ce chapitre présente d'abord les principes de base de l'électrothérapie. Ensuite il explique les notions anatomiques et physiologiques nécessaires pour comprendre cette technique.

Partie 01: généralités sur les muscles et les nerfs

1. La douleur

La douleur est un phénomène physique et émotionnel complexe, ressenti comme désagréable, et jouant un rôle fondamental dans la protection de l'organisme. Elle signale une lésion réelle ou potentielle des tissus et permet d'adopter des comportements de défense (retrait, repos, protection...).

Selon la définition de l'Association Internationale pour l'Étude de la Douleur (IASP), la douleur est : « une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable associée à une lésion tissulaire réelle ou potentielle, ou décrite en ces termes ».

La douleur mobilise non seulement des mécanismes physiologiques, mais aussi des aspects affectifs, cognitifs et comportementaux.

1.1 Types de douleurs

- **Douleur aiguë :**

C'est une douleur récente, de courte durée, souvent intense. Elle joue un rôle protecteur et d'alerte, signalant une atteinte de l'organisme (blessure, inflammation, fracture...). Elle disparaît généralement avec la guérison.

- **Douleur chronique :**

Elle persiste au-delà de trois à six mois, parfois sans cause identifiable ou après la guérison apparente de la lésion. Elle devient une pathologie en soi, avec des conséquences psychologiques, sociales et fonctionnelles importantes.

1.2 Mécanismes physiopathologiques de la douleur

Les douleurs peuvent être classées en fonction de leur origine physiologique :

- **Douleur neuropathique (ou érogène) :**

Elle résulte d'une lésion ou d'un dysfonctionnement du système nerveux périphérique ou central. Elle est souvent chronique, décrite comme des brûlures, fourmillements ou décharges électriques (ex. : sciatique, zona, neuropathie diabétique).

- **Douleur avec dysfonctionnement du système nerveux (douleur centrale)**

Cette catégorie comprend certains syndromes complexes comme le syndrome douloureux régional complexe (SDRC), apparaissant après un traumatisme ou une chirurgie. Elle associe douleur, troubles moteurs et anomalies vasomotrices.

- **Douleur psychogène :**

Elle est influencée par des facteurs psychologiques, sans lésion tissulaire objectivable. Elle n'est pas simulée mais découle de troubles affectifs, anxieux ou dépressifs. Le diagnostic repose sur l'analyse du contexte émotionnel et comportemental du patient. Ils peuvent être classés en fonction de leur origine physiologique.

- **Les douleurs par excès de nociception**

C'est la forme la plus fréquente. Elle est due à l'activation des nocicepteurs périphériques (récepteurs à la douleur) par un stimulus mécanique, thermique ou chimique, souvent dans un contexte inflammatoire (ex. : brûlure, entorse).

1.3 Transmission et modulation de la douleur

Les signaux douloureux voyagent des récepteurs périphériques vers la moelle épinière via les fibres A δ (douleur aiguë) et C (douleur diffuse). Ils sont ensuite transmis au cerveau (thalamus, cortex) où la douleur est perçue.

La modulation de la douleur se fait à trois niveaux :

- Périphérique : réduction de l'inflammation,
- Spinal : blocage dans la moelle via des interneurons,
- Central : influence des émotions et du cerveau.

Le TENS agit surtout au niveau spinal, en activant les fibres A β (non douloureuses) qui inhibent la transmission des signaux douloureux, selon la théorie du Gate Control (Melzack & Wall, 1965).

2. Les muscles

Le mot muscle vient du mot latin « musculus » qui signifie « petite souris », les muscles peuvent être considérés comme les « moteurs » de l'organisme. Les muscles sont des tissus du corps humain composés de fibre musculaire, qui se contractent lors des mouvements corporels. On dénombre 656 muscles dans le corps humain. Il existe trois types, le muscle cardiaque est un muscle différent des autres, notamment car il est soumis à l'influence des hormones, et se contracte de façon involontaire. Les muscles lisses, tels que ceux présents au niveau de l'estomac, sont des muscles qui fonctionnent sans stimulus volontaire. Quant aux muscles squelettiques, ils sont liés aux os et permettent de les mouvoir. La forme des muscles est allongée, plate ou circulaire. (Figure 1.1) [9]

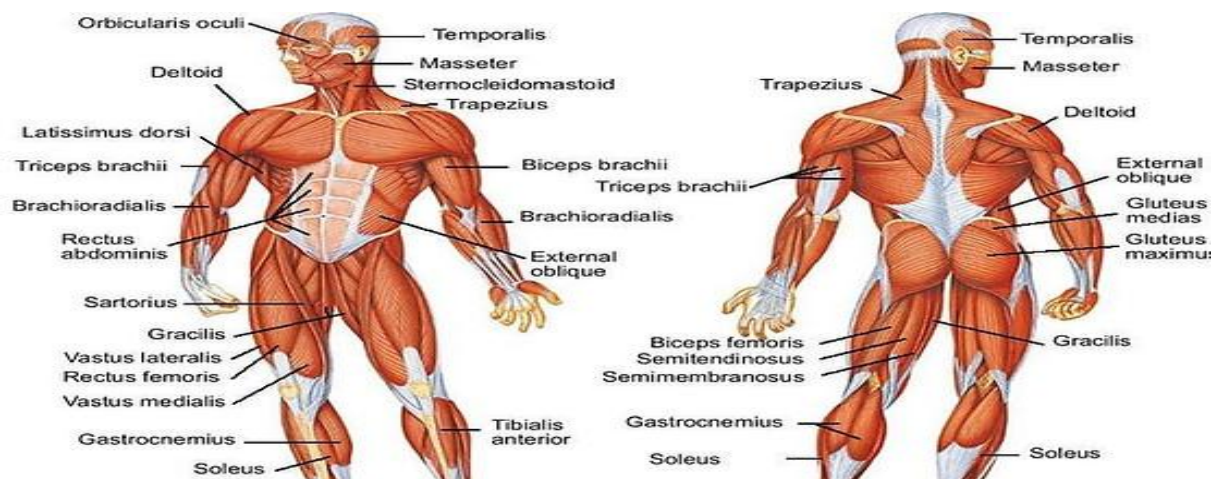


Figure 1.1 : Les muscle de corps humain (vues antérieure et postérieur)

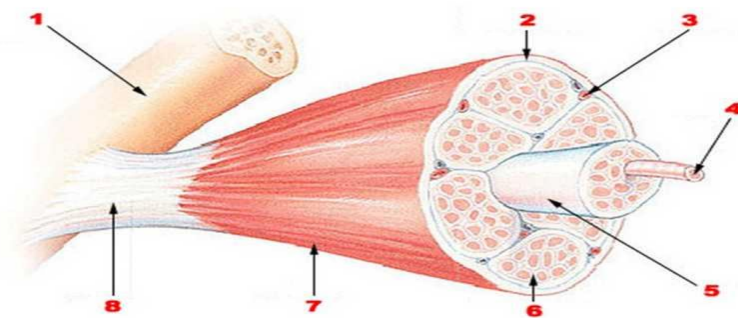
2.1 Propriétés des muscles

Les muscles sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- **Excitabilité** : C'est la propriété de répondre par sa réponse naturelle à toute excitation portée sur lui. Le muscle réagit à des excitations mécaniques (pincement), thermiques, chimiques.
- **Contractilité** : C'est la faculté du muscle de se raccourcir donc de rapprocher ses extrémités et de mouvoir les éléments squelettiques où ils sont fixés
- **Elasticité** : Propriété de se laisser allonger par traction et de revenir à sa position première lorsque cesse la traction. Elle joue le rôle d'amortisseur, supprimant les chocs, améliorant le rendement.
- **Tonicité** : Propriété qu'à le muscle vivant en dehors de tout mouvement actif de demeurer dans un état de tension, de légère contraction permanente involontaire : tonus musculaire. [1]

2.2 Structure du muscle squelettique

Si on observe une coupe transversale d'un muscle squelettique, on observe de l'extérieur vers l'intérieur :(figure 1.2)



Structure d'un muscle strié squelettique
 1 Os – 2 Périmysium – 3 Vaisseau sanguin – 4 Fibre – 5 Faisceau –
 6 Endomysium – 7 Épimysium – 8 Tendon

Figure 1.2 : Structure du muscle squelettique

- une enveloppe (ou gaine) conjonctive dénommée aponévrose musculaire
- des cloisons de tissu conjonctif qui divisent le muscle en grands compartiments que d'autres cloisons divisent en compartiments plus petits appelés faisceaux

- à l'intérieur des faisceaux sont regroupées les cellules du muscle dénommées fibre musculaires striées
- l'activité normale d'un muscle squelettique est tributaire de son innervation et d'un approvisionnement sanguin abondant. Ainsi, on trouve au niveau des muscles squelettiques des nerfs (neurofibres) et des vaisseaux sanguins. [12] [7]

3. Anatomie des nerfs

Le système nerveux périphérique est constitué de nerfs qui relient le système nerveux central (cerveau et moelle épinière) aux organes et muscles du corps. Un nerf est une structure complexe, formée par l'assemblage de fibres nerveuses (axones) entourées de tissus conjonctifs. [11]

Dans le cadre de la stimulation électrique (TENS), la connaissance de l'anatomie nerveuse est essentielle pour cibler efficacement les fibres A β responsables de l'inhibition de la douleur, tout en évitant l'activation indésirable des fibres douloureuses A δ et C.

3.1 Structure générale d'un nerf

Un nerf est composé de plusieurs éléments anatomiques

- Axone : prolongement du neurone qui conduit l'influx nerveux.
 - Gaine de myéline : enveloppe lipidique isolante autour de certains axones, produite par les cellules de Schwann, qui accélère la conduction du signal.
 - Endonèvre : tissu conjonctif fin entourant chaque fibre nerveuse.
 - Périnèvre : gaine entourant un faisceau de fibres (fascicule).
 - Épinèvre : couche externe qui regroupe tous les fascicules pour former le nerf.
- [9]

3.2 Types de fibres nerveuses

Les fibres nerveuses sont classées en fonction de leur vitesse de conduction, de leur diamètre, de leur présence ou non de gaine de myéline, et de leur fonction sensorielle ou motrice. Cette classification est essentielle pour comprendre la transmission de la douleur et les mécanismes d'action de la neurostimulation comme le TENS.

- Fibres A α : Elles innervent les muscles squelettiques et sont responsables de la commande motrice volontaire. On les retrouve aussi dans les fibres des fuseaux neuromusculaires pour le contrôle de la posture. [11]
- Fibres A β : Elles transmettent les informations sensorielles non douloureuses issues de la peau et des récepteurs mécaniques. Ce sont ces fibres que le TENS stimule préférentiellement pour inhiber la transmission de la douleur via la théorie du "Gate Control"[10]
- Fibres A δ : Elles véhiculent les signaux de douleur rapide, localisée et aiguë, ainsi que des informations de température. Elles sont activées lors d'un stimulus nociceptif soudain (piqûre, coup, brûlure légère). [11],[10]
- Fibres C : Elles transmettent une douleur lente, sourde, mal localisée et persistante, souvent associée à une inflammation. Elles sont également impliquées dans la transmission de la chaleur, du froid intense et de certaines sensations émotionnelles (par exemple le plaisir douloureux ou la démangeaison). [11]

3.3 Rôle fonctionnel

Les nerfs périphériques se divisent en deux catégories :

- Nerfs sensitifs : transmettent les informations des récepteurs sensoriels (peau, muscles, organes) vers la moelle épinière. [12]
- Nerfs moteurs : conduisent les ordres du système nerveux central vers les muscles pour provoquer une contraction. [12]

Partie 02 :l'électrothérapie

2.1 Kinésithérapie/ physiothérapie

La kinésithérapie est très utilisée à la suite d'une blessure, d'une intervention chirurgicale ou d'un événement traumatisant pour le corps humain. La kinésithérapie concerne aussi bien le squelette que les fonctionnalités de l'organisme. Elle améliore la qualité de vie du patient. Sur prescription médicale, le kiné peut réaliser des bilans de capacité. Il intervient parfois, sans prescription médicale, dans le domaine sportif (remise en forme, relaxation, massage...) ou esthétique (exercices de relaxation pour le visage, par exemple). [1]

2.2 Définition de l'électrothérapie



Figure 1.3 : Premier appareil d'électrothérapie

C'est un mot complexe (électro=électrique, thérapie=thérapeutique)

L'électrothérapie est l'ensemble des méthodes/ techniques qui font utiliser l'électricité pour soulager la douleur et traiter des maladies. [1]

L'impulsion électrique provoque la contraction musculaire du ou des muscles choisis sans que le système nerveux central (cerveau) ne soit mis à contribution. .

L'électrothérapie est capable d'activer deux sortes de tissus dans l'organisme : les muscles (fibres musculaires) et les nerfs (fibres nerveuses). Il est possible de faire la différence entre les nerfs sensitifs (qui transmettent les sensations de contact et de chaleur) et les nerfs moteurs (responsables de la transmission des informations du cerveau vers le muscle). La stimulation des nerfs sensitifs est employée pour produire un effet analgésique, alors que la stimulation des nerfs moteurs est mise en œuvre dans le but de réhabilitation. En ce qui concerne la stimulation des nerfs moteurs, il est à noter qu'il nécessite 500 fois plus de courant pour stimuler directement la fibre nerveuse plutôt que le nerf moteur. [6]

La stimulation directe du muscle ne sera envisagée que si la fibre nerveuse motrice est endommagée et rend impossible une électrostimulation neuromusculaire classique (NMES) : ce mode dit « dénervé ».

En électrothérapie, on distingue deux techniques principales :

- L'application directe de courants électriques à travers la peau, à l'aide d'électrodes.

- L'utilisation d'autres formes d'énergie comme les vibrations mécaniques, les radiations lumineuses (luminothérapie), les ultrasons ou les ondes électromagnétiques.
- l'électrothérapie est souvent voire toujours associée à une rééducation fonctionnelle pour de meilleurs résultats.[1]

2.3 La TENS (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation) :



Figure 1.4 : appareil d'électrothérapie

Est une méthode d'électrothérapie utilisée pour soulager la douleur. Elle consiste à envoyer de légers courants électriques à travers la peau à l'aide d'électrodes placées sur la zone douloureuse.

Cette technique stimule les nerfs de manière à réduire la sensation de la douleur, soit en bloquant les signaux douloureux, soit en favorisant la libération d'endorphines (hormones naturelles antidouleur).

2.3.1 Les indications de La TENS

La TENS est largement utilisée pour soulager divers types de douleurs, tant aiguës que chroniques. Elle est particulièrement indiquée dans les cas suivants :

- Douleurs chroniques : telles que les lombalgies, cervicalgies ou douleurs persistantes du dos.
- Douleurs articulaires : notamment celles liées à l'arthrose ou à la polyarthrite rhumatoïde.
- Douleurs musculaires : incluant les tensions, spasmes ou contractures.
- Douleurs neuropathiques : comme la sciatique, les névralgies ou les douleurs post-zostériennes.
- Douleurs post-opératoires : pour aider à la récupération après une intervention chirurgicale.
- Céphalées de tension: en complément d'autres approches non médicamenteuses.

- Douleurs associées à des pathologies dégénératives : par exemple dans la maladie de Parkinson ou la sclérose en plaques. [2]

2.3.2 Les contre indications de La TENS

Malgré sa bonne tolérance et sa large utilisation en pratique clinique, la technique TENS présente certaines contre-indications qu'il convient de respecter afin d'éviter tout risque. Elle ne doit pas être appliquée dans les situations suivantes:

- Chez les personnes porteuses de pacemaker ou d'autres dispositifs cardiaques implantables, en raison du risque d'interférences pouvant perturber leur fonctionnement.
- Chez les patients épileptiques car la stimulation électrique pourrait potentiellement déclencher une crise.
- Chez les femmes enceintes notamment au cours du premier trimestre ou sur la région abdominale et lombaire, par précaution pour le fœtus.
- En présence d'anomalies cutanées plaies ouvertes, infections, éruptions ou inflammations locales, afin d'éviter toute aggravation.
- Chez les personnes atteintes de tumeurs ou de néoplasmes car la stimulation pourrait théoriquement favoriser la croissance cellulaire dans les tissus malades.

Il est donc essentiel d'évaluer chaque situation individuellement et de consulter un professionnel de santé avant d'utiliser la TENS, afin d'assurer une application sûre et adaptée. [2]

2.3.3 Les avantages de La TENS

L'efficacité de la neurostimulation électrique transcutanée repose non seulement sur ses mécanismes d'action, mais aussi sur les nombreux avantages qu'elle offre dans la gestion de la douleur.

- Non invasive, elle ne nécessite ni injection ni intervention chirurgicale, ce qui réduit considérablement les risques pour le patient.
- Facile à utiliser, elle peut être appliquée aussi bien en milieu médical que dans un cadre domestique avec un appareil adapté.
- Effets secondaires rares, ce qui en fait une option sûre, même pour des traitements prolongés.

- Soulagement rapide dans certains modes d'application, en particulier avec le mode Gate Control.
- Amélioration de la qualité de vie, en réduisant l'intensité et la fréquence des douleurs chroniques, permettant une meilleure mobilité et une reprise des activités quotidiennes.
- Réduction de la consommation d'antalgiques, ce qui limite les effets indésirables liés aux traitements médicamenteux.
- Polyvalence, la TENS peut être utilisée pour différents types de douleurs (musculaires, articulaires, neuropathiques...).
- Traitement alternatif aux thérapeutiques médicamenteuses : s'inscrit dans les approches non médicamenteuses du traitement de la douleur. [2]

2.3.4 Les effets secondaires de La TENS

Généralement la TENS est bien tolérée et ne présente pas d'effets secondaires significatifs. Toutefois, chez certaines personnes particulièrement sensibles, de rares effets bénins peuvent survenir, tels que : (Ces réactions sont généralement passagères et sans gravité)

- Irritation cutanées.
- Sensation désagréables durant la stimulation.
- Éruptions cutanées localisées.
- des rougeurs de la peau au niveau des électrodes peuvent apparaître après la séance. [2]

1.3.5 types d'appareils TENS



Figure 1.5 : Appareil TENS Standard

- TENS Standard :

Modèle de base avec réglage manuel de l'intensité et de la fréquence.

- TENS à Haute Fréquence :

Utilise des impulsions rapides (50–120 Hz) pour bloquer la douleur (mode *Gate Control*).

- TENS à Basse Fréquence :

Stimule la libération d'endorphines (1–10 Hz) pour un soulagement plus durable (mode Endorphinique).

- TENS Numérique :



Figure 1.6 : Appareil TENS Numérique

Plus précis avec écran LCD, programmation automatique, et modes pré-réglés.

- TENS Sans Fil :

Compact, discret, souvent contrôlé via smartphone (Bluetooth).



Figure 1.7: TENS Sans Fil

- **TENS Combinés :**

Intègrent d'autres thérapies (EMS, ultrasons, chaleur infrarouge).



Figure 1.8 : Appareil TENS combinés

2.3.6 Accessoires d'appareils TENS

Les appareils TENS sont généralement fournis avec un ensemble d'accessoires essentiels permettant leur bon fonctionnement et une utilisation pratique et sécurisée. Parmi les accessoires les plus courants, on retrouve :



Figure 1.9: Accessoires d'appareils TENS

- Electrodes : elles assurent le contact entre l'appareil et la peau, permettant la transmission du courant électrique.
- Câbles : ils relient les électrodes à l'appareil et assurent la transmission du signal électrique.
- Piles / batterie rechargeable: sources d'alimentation du dispositif, elles garantissent l'autonomie de l'appareil.
- Manuel d'utilisation : il fournit les instructions nécessaires à une utilisation correcte et sécurisée de l'appareil.
- Etui / pochette de transport : pratique pour protéger et transporter l'appareil et ses accessoires, notamment lors d'un usage à domicile ou en déplacement.

2.3.7 Paramètres principaux de la TENS

La Neurostimulation Électrique Transcutanée repose sur plusieurs paramètres techniques qui doivent être soigneusement ajustés pour garantir l'efficacité du traitement tout en assurant le confort du patient. Ces paramètres influencent directement la nature de la stimulation, son intensité, et les effets ressentis.

1 .Fréquence de stimulation (Hz)

La fréquence correspond au nombre d'impulsions électriques par seconde. Elle détermine le mode de stimulation :

- Haute fréquence (50–120 Hz) : utilisée dans le mode Gate Control pour bloquer rapidement les signaux de douleur.
- Basse fréquence (1–10 Hz) : utilisée dans le mode endorphinique pour stimuler la libération d'endorphines. [2]

2. Durée d'impulsion (μ s)

Elle représente le temps pendant lequel chaque impulsion est appliquée. Elle varie généralement entre 50 et 250 microsecondes. Une durée plus longue permet une stimulation plus profonde, mais elle peut être moins confortable. [7]

3. Intensité (mA)

L'intensité du courant utilisé en TENS varie généralement entre 0,5 mA et 80 mA, selon la tolérance du patient et la zone traitée. Elle est ajustée progressivement jusqu'à ce que le patient ressente une sensation de picotement confortable mais non douloureuse.

Ce paramètre est personnalisable, car il dépend de la sensibilité individuelle, de l'état cutané, de la position des électrodes et du type de douleur traité. [8]

4. Durée de la séance

Une séance de TENS dure généralement entre 20 et 30 minutes, mais cela peut être adapté en fonction de la pathologie, de la localisation de la douleur et de la réponse du patient. [2]

5. Nombre de canaux et d'électrodes :

Selon le modèle de l'appareil, il est possible d'utiliser plusieurs canaux (généralement 1 à 4), avec deux électrodes par canal, ce qui permet de couvrir plusieurs zones douloureuses en simultané. [7]

2.3.8 Modes de la TENS

Pour déterminer le mode de stimulation utilisé par un appareil TENS, il faut principalement se baser sur la fréquence des impulsions

- **Mode endorphinique**

Le mode endorphinique est une méthode de stimulation électrique utilisant de basses fréquences, généralement comprises entre 1 et 10 Hz. Son objectif principal est de favoriser la

libération d'endorphines, des substances naturelles sécrétées par le cerveau, reconnues pour leurs effets antalgiques.

Contrairement au mode Gate Control, qui agit de manière rapide et temporaire, le mode endorphinique donne un soulagement plus lent mais plus durable, ce qui le rend particulièrement adapté au traitement des douleurs chroniques, telles que les lombalgies, les douleurs articulaires ou les syndromes douloureux persistants.

Les séances durent généralement entre 20 et 40 minutes, avec des impulsions plus longues, permettant une stimulation plus efficace des fibres nerveuses responsables de la production d'endorphines.[7]

Ce mode est apprécié pour son efficacité prolongée, bien qu'un délai soit nécessaire avant l'apparition des effets analgésiques.

- **Gate Control**

Le mode Gate Control de la TENS (Neurostimulation Électrique Transcutanée) repose sur la théorie du "portillon" de la douleur, selon laquelle la stimulation de certaines fibres nerveuses peut bloquer ou empêcher la transmission des signaux douloureux vers le cerveau au niveau de la moelle épinière.

Ce mode utilise une fréquence élevée, généralement comprise entre 50 et 120 Hz, avec des impulsions courtes, ce qui permet un soulagement rapide de la douleur, bien que ses effets soient souvent temporaires.[2]

Le mode Gate Control est particulièrement indiqué pour les douleurs aiguës ou passagères, telles que les douleurs post-opératoires, les entorses ou les blessures récentes. Il agit en stimulant les fibres nerveuses de type A β , responsables de la transmission des signaux tactiles, qui viennent inhiber les messages douloureux transmis par les fibres plus lentes, comme les fibres C.

Ce mode est non invasif, bien toléré, et souvent utilisé en première intervention pour obtenir un soulagement immédiat de la douleur. [9]

Caractéristique	Mode Gate Control	Mode Endorphinique
Fréquence	50 – 120 Hz	1 – 10 Hz
Durée d'impulsion	Courte (50 à 100 microsecondes)	Longue (200 à 250 microsecondes)
Mécanisme d'action	Blocage des signaux de douleur à la moelle épinière via stimulation des fibres A β	Stimulation des nerfs pour libérer des endorphines (antalgiques naturels)
Effet	Soulagement rapide mais temporaire	Soulagement plus lent mais durable
Indications principales	Douleurs aiguës (blessures, douleurs post-opératoires)	Douleurs chroniques (arthrose, lombalgie, fibromyalgie)
Durée typique d'une séance	15 à 30 minutes	20 à 40 minutes
Avantages	Action rapide, facile à utiliser	Effet prolongé, agit sur la douleur profonde

Tableau 1: Comparaison des différents modes de stimulation TENS

2.4 Les électrodes

Les électrodes sont les interfaces entre l'appareil d'électrothérapie et la peau du patient. Elles permettent de transmettre le courant électrique de manière efficace et sécurisée vers les tissus sous-jacents. Leur choix, leur positionnement et leur entretien sont essentiels pour garantir une stimulation optimale et éviter les effets indésirables comme les brûlures ou irritations cutanée

2.4.1 Choix d'électrode

Selon l'utilisation, on distingue les électrodes et accessoires à usage unique, à patient unique et à patients multiples.

Certains accessoires, comme les électrodes autocollantes, compresses, non-tissés et sondes jetables, sont à usage unique. D'autres, comme les sachets spongieux ou sondes réutilisables, nécessitent une protection jetable et un nettoyage rigoureux. Enfin, les électrodes en plastique, ponctuelles, sangles lavables et déclencheurs manuels sont réutilisables entre patients, à condition d'être désinfectés après chaque usage.

- Selon la taille, la dimension des électrodes à employer est déterminée par la région du corps où l'on prévoit d'effectuer la stimulation et par la durée de l'impulsion sélectionnée. En règle générale, plus la durée de l'impulsion est longue plus le courant en mA augmente et plus la taille de l'électrode doit être importante.
- Selon la direction de courant

1. Courants unidirectionnels

On emploie des électrodes en plastique carboné ou des électrodes ponctuelles tapissées d'une matière spongieuse humide, puis d'un bandage ou d'un matériau non tissé jetable. Nous ne recourons jamais aux électrodes adhésives pour l'application de courants unidirectionnels, en raison du risque de brûlures chimiques.

2. Courants bidirectionnels

Tous les types d'électrodes sont utilisables : des électrodes adhésives, des électrodes en plastique carbone, des sondes périnéales et des électrodes ponctuelles.

2.4.2 Les techniques de placement des électrodes

Le placement correct des électrodes est essentiel pour assurer l'efficacité de la stimulation TENS. On distingue principalement deux techniques de positionnement :

- **La technique unipolaire**

On utilise une électrode de grande taille, aussi appelée électrode de dispersion ou indifférente, qui est positionnée sur une zone différente de celle stimulée, complétée par une ou deux électrodes qualifiées d'actives, placées sur le muscle. L'intensité électrique par unité de surface atteint son maximum au point de l'électrode ou des électrodes actives.

- **La technique bipolaire**

Deux électrodes, habituellement de dimensions identiques, sont positionnées sur le muscle à stimuler, l'une au niveau proximal et l'autre au niveau distal. Dans cette situation, le passage du courant est plus limité et les deux électrodes peuvent stimuler le nerf si un courant biphasé est employé.

2.5 Les brûlures électriques

Les brûlures électriques sont des lésions de la peau ou des tissus profonds causées par le passage d'un courant électrique. Elles peuvent être physiques, dues à la chaleur produite par l'effet Joule, ou chimiques, provoquées par des réactions électrolytiques au niveau des électrodes.

2.5.1 Les types de brûlures

- **Brûlures physiques**

Elle est provoquée par une chaleur excessive générée par le passage du courant électrique à travers les tissus. Selon la loi de Joule ($W = R \times I^2 \times t$), l'énergie calorifique dépend directement de l'intensité du courant et du temps d'application. Si l'intensité est trop élevée ou les électrodes mal posées, cela peut entraîner une surchauffe locale et une brûlure.

- **Brûlures chimiques**

La brûlure chimique est due aux effets électrolytiques des courants unidirectionnels qui produisent la formation d'acide sous l'anode et de base sous la cathode.

Conclusion

L'électrothérapie représente aujourd'hui une méthode thérapeutique incontournable dans le domaine de la rééducation fonctionnelle et de la gestion de la douleur. Grâce à l'application contrôlée de courants électriques, elle permet d'agir efficacement sur les nerfs et les muscles, offrant un soulagement à la fois rapide et durable selon le mode utilisé. Parmi ses outils les plus répandus, la TENS (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation) se distingue par sa simplicité d'utilisation, son efficacité et son excellent profil de tolérance.

Elle offre deux grands modes de traitement : le mode Gate Control, pour une action analgésique rapide dans les douleurs aiguës, et le mode endorphinique, ciblant les douleurs chroniques avec un effet plus progressif mais durable. Les paramètres techniques (fréquence, durée d'impulsion, intensité) ainsi que le choix des électrodes et leur positionnement sont des éléments clés pour optimiser les résultats du traitement.

Bien que cette technique soit non invasive et globalement sécuritaire, des précautions doivent être prises pour éviter certains effets secondaires ou risques, notamment les brûlures, principalement liées à une mauvaise utilisation des courants unidirectionnels ou à la thermothérapie.

Ainsi, l'électrothérapie, et en particulier la TENS, représente un complément précieux aux approches classiques, capable d'améliorer significativement la qualité de vie des patients tout en réduisant la dépendance aux médicaments antalgiques.

CHAPITRE II :
Conception et Traitement du Signal dans
le Système TENS

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la réalisation pratique de notre dispositif de neurostimulation électrique transcutanée (TENS). Cette partie inclut le choix du matériel utilisé pour la génération du signal ainsi que les composants associés.

Nous décrivons également l’organigramme du programme implanté sur la carte, permettant de contrôler dynamiquement les paramètres de stimulation (fréquence, durée, repos) à l’aide de boutons poussoirs.

Enfin, nous abordons les étapes d’amplification et de filtrage du signal, nécessaires à l’obtention d’un signal propre et efficace pour une application thérapeutique.

1. Matériel utilisé

1.1 La carte esp32



Figure 2.1 : Brochage de la carte esp32

La carte ESP32 est un microcontrôleur puissant et polyvalent largement utilisé dans les projets d’électronique embarquée grâce à ses nombreuses fonctionnalités intégrées. Développée par EspressifSystems elle se distingue par sa double connectivité sans fil (Wi-Fi et Bluetooth)

son processeur dual-core 32 bits et ses interfaces multiples pour la communication et le contrôle de périphériques externes. [13]

L'ESP32 dispose de deux broches DAC « convertisseur numérique-analogique » : GPIO25 et GPIO26.

De plus de nombreuses broches de l'ESP32 prennent en charge les interruptions.

- C'est pour ces raisons que nous avons choisi d'utiliser la carte ESP32 dans notre projet.

1.2 Logiciel IDE Arduino

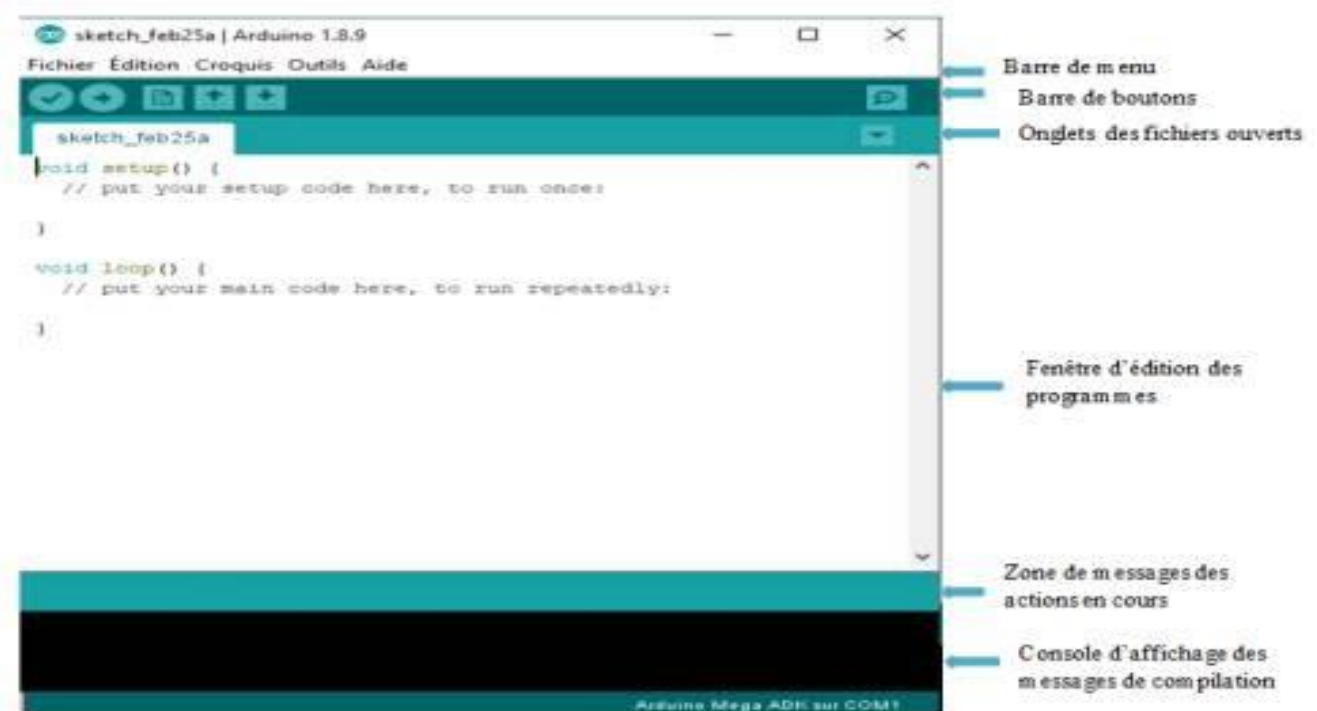


Figure 2.2 : Ide arduino

L'IDE Arduino (Integrated Development Environment) est un environnement de développement open-source conçu pour programmer facilement des cartes d'acquisitions, telles que l'Arduino mais aussi des microcontrôleurs compatibles comme l'ESP32. Il offre une interface simple et intuitive permettant d'écrire, de compiler et de téléverser du code en langage C/C++ directement sur la carte. L'IDE intègre un éditeur de texte, un compilateur, un moniteur série ainsi qu'un système de gestion de bibliothèques facilitant l'ajout de fonctionnalités. Grâce à sa large communauté et à sa compatibilité avec de nombreux microcontrôleurs, l'IDE Arduino

est devenu un outil incontournable dans le domaine de l'électronique embarquée et de la conception de prototypes.[14]

1.3 Génération de signal sinusoïdale avec la carte esp32

Nous avons utilisé la carte ESP32 pour générer un signal sinusoïdal analogique, nécessaire à la stimulation électrique de type TENS. Cette génération repose sur l'utilisation d'une broche DAC (Convertisseur Numérique-Analogique) qui permet de transformer des valeurs numériques en tensions analogiques comprises entre 0 V et environ 3,3 V.

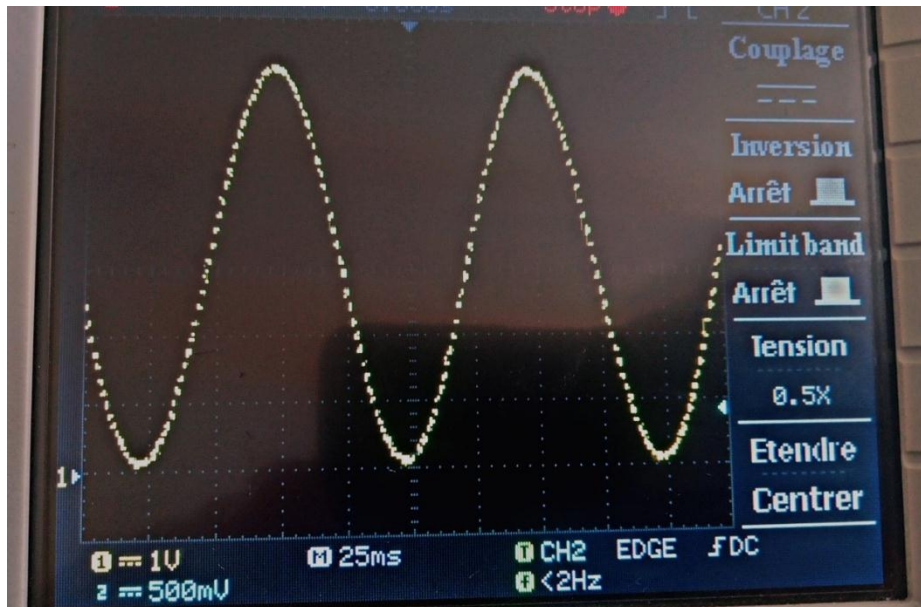


Figure 2.3 : Signal sinusoïdale obtenu

1.3.1 Les paramètres du signal sinusoïdale

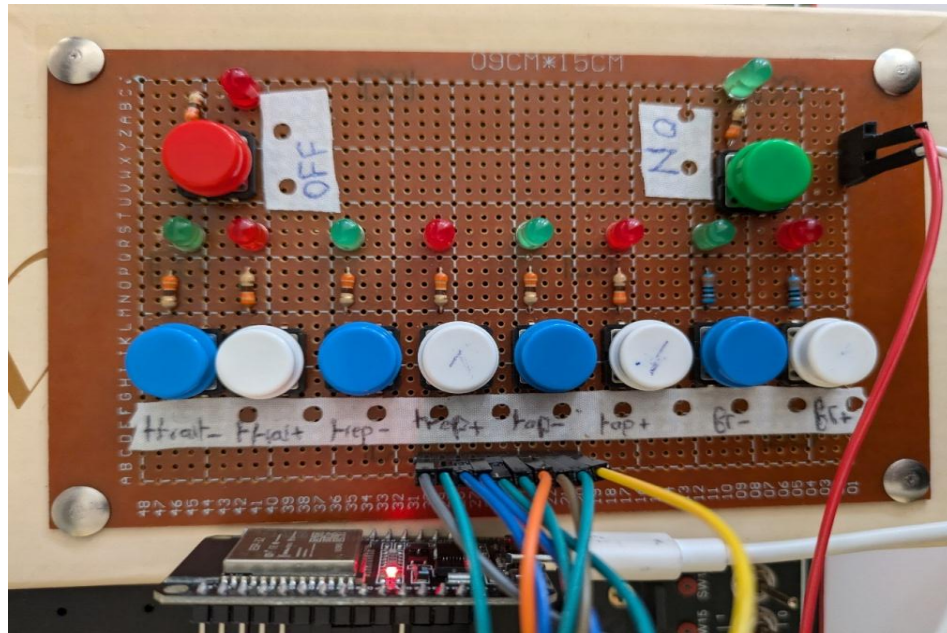


Figure 2.4 : Circuit de commande

En utilisant le logiciel de programmation Arduino IDE nous avons développé un programme qui génère à la sortie du DAC des impulsions sinusoïdales à une amplitude et une fréquence contrôlées.

Nous avons associée à chaque bouton poussoir, une fonction spécifique dans le contrôle ou l'ajustement des paramètres du signal. Une Led est associée à chaque bouton poussoir pour détecter son opérabilité.

- **Mise en marche et arrêt de l'appareil (ON/OFF)**

Lorsqu'il est pressé, Le bouton ON (B1), active la génération du signal TENS. En même temps la LED s'allume indiquant la mise en marche. Le fonctionnement est automatiquement limité à une durée de 2 minutes (120 secondes), passé ce délai le système s'arrête automatiquement.

Lorsqu'il est pressé, Le bouton OFF (B2), il interrompt la génération du signal la LED s'allume indiquant l'arrêt du processus.

- **La fréquence**

Deux boutons poussoirs sont associés à la variation de la fréquence du signal, l'un pour l'augmenter et l'autre pour la diminuer. Ces boutons permettent de modifier la fréquence de l'impulsion sinusoïdale par paliers de 10 Hz.

- **Le temps de repos**

Deux boutons poussoirs sont associés à l'ESP32 pour ajuster la durée de la phase de repos du signal, l'un pour l'augmenter et l'autre pour la diminuer. Ces boutons permettent de modifier la durée de la phase de repos par paliers de 10 ms.

- **Le temps d'application**

Deux boutons poussoirs sont associés à l'ESP32 pour ajuster la durée de la phase active du signal, l'un pour l'augmenter et l'autre pour la diminuer. Ces boutons permettent de modifier la durée de la phase active par paliers de 10 ms.

2. Organigramme du programme

Nous avons présenté notre programme à l'aide de cet organigramme qui illustre de manière structurée les différentes étapes du fonctionnement du système. Il permet de visualiser le déroulement logique du code depuis l'initialisation des variables jusqu'à la génération continue du signal sinusoïdal via le DAC de l'ESP32. L'organigramme met également en évidence l'intégration de fonctions liées à la variation des paramètres de stimulation à travers des boutons poussoirs dédiés à cette fin. Grâce à ces boutons l'utilisateur peut ajuster en temps réel la fréquence du signal, la durée de la phase active $T(\text{tapp})$ ainsi que la durée de la phase de repos $T(\text{repos})$ permettant ainsi d'adapter la stimulation aux besoins thérapeutiques spécifiques de chaque patient. Ce fonctionnement interactif rend le dispositif à la fois flexible, personnalisable et intuitif.

BP : Bouton Poussoir

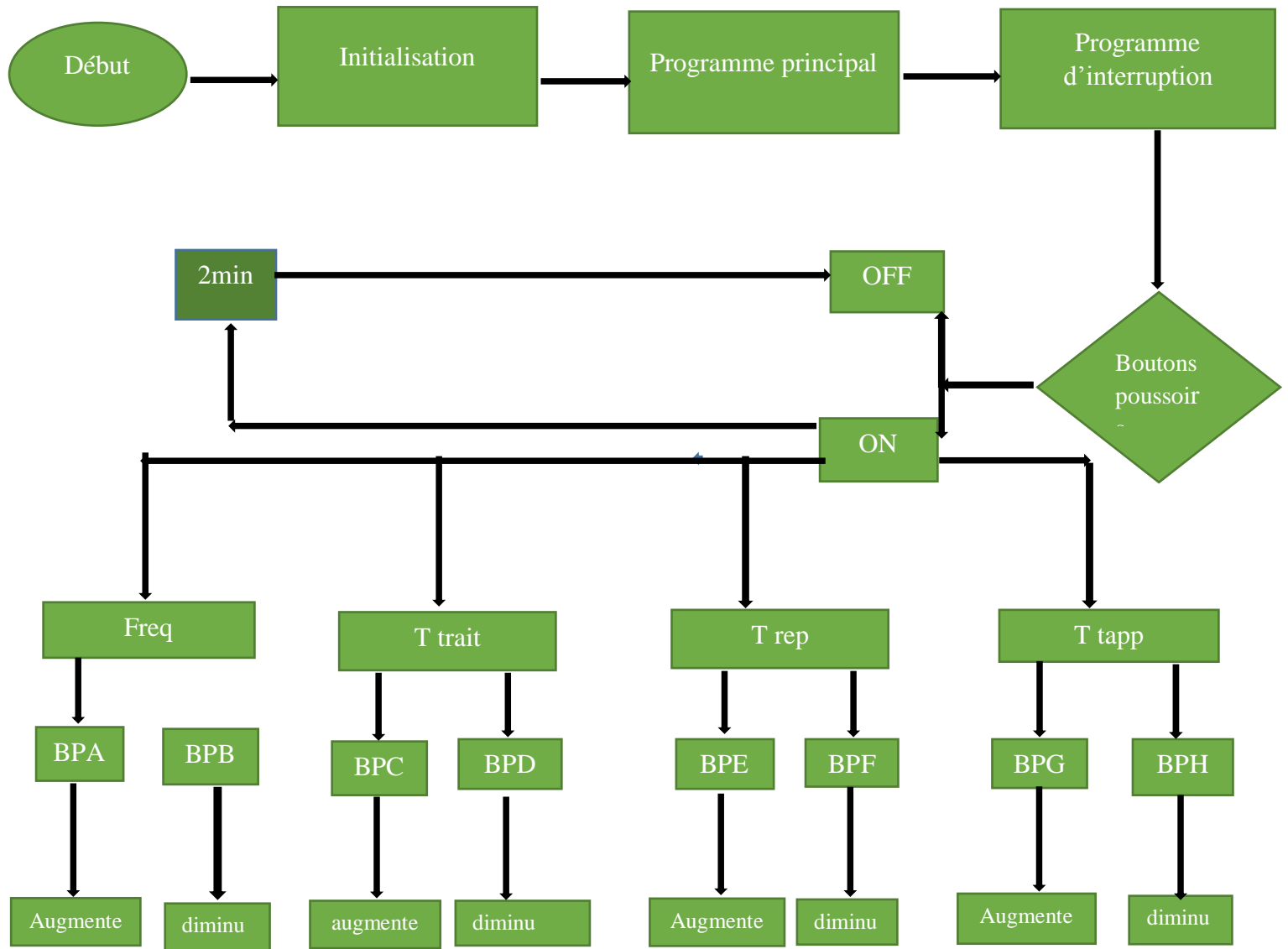


Figure 2-5 : Organigramme fonctionnelle

2.1 Amplification de tension

Afin d'obtenir une tension de sortie suffisante pour la stimulation transcutanée, nous avons utilisé un circuit d'amplification basé sur un amplificateur opérationnel LM358. Ce montage permet d'augmenter l'amplitude du signal généré par la carte ESP32 qui est initialement limitée à environ 3,3 V en sortie DAC.

Le circuit est configuré en amplificateur non inverseur, avec les valeurs suivantes :

$$G=1+ R2/R1 \quad \text{Avec}$$

$$R1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 20 \text{ k}\Omega$$

Le signal sinusoïdal d'entrée est amplifié avec un facteur de 3

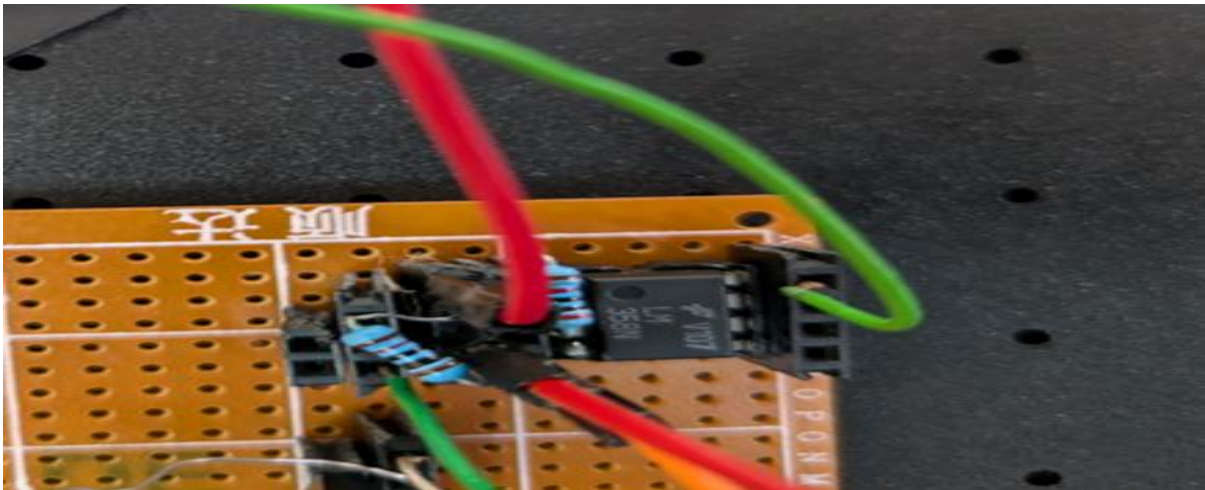


Figure 2.6 : Circuit d'amplification



Figure 2.7 : Signal sinusoïdale après amplification

2.2 Filtrage de la composante continue

Après l'amplification du signal il est nécessaire d'éliminer la composante continue introduite par le DAC

Pour cela un filtre passe-haut de premier ordre a été mis en place. Ce filtre est composé des éléments suivants :

- Une résistance $R = 320 \text{ k}\Omega$
- Un condensateur $C = 1 \mu\text{F}$

La fonction de transfert du filtre est : $H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{sRC}{1+sRC}$

La fréquence de coupure de ce filtre est déterminée par la formule :

$$f_c = 1/2\pi RC$$

$$f_c = 1/2\pi * 320000 * 1 * 10^{-6} \approx 0,5 \text{ Hz}$$

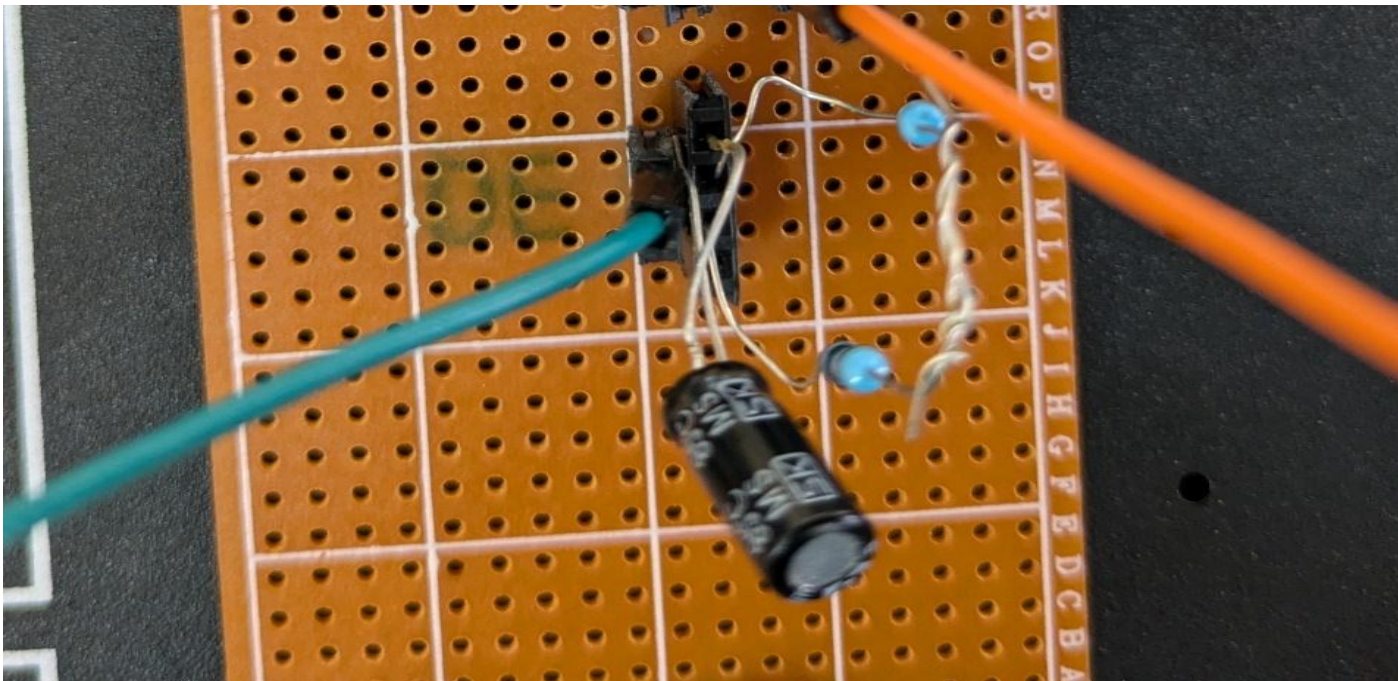


Figure 2.8 : Circuit de filtre passe haut

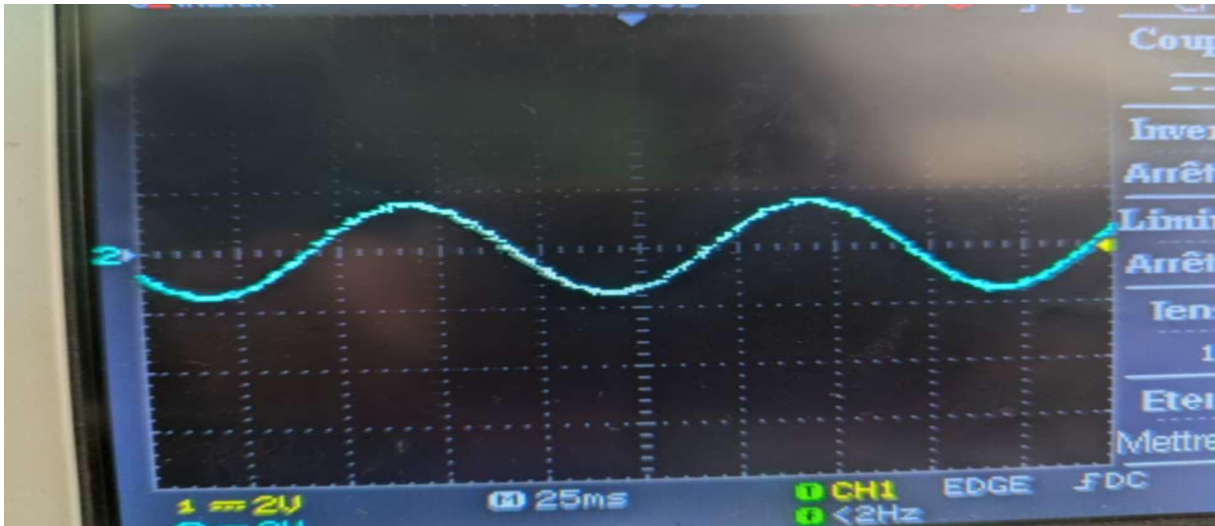


Figure 2.9 : Signal sinusoïdale après filtrage

Cette fréquence a été choisie pour laisser passer les fréquences de stimulation typiques de la TENS (généralement supérieures à 10 Hz) tout en bloquant efficacement la composante continue (0 Hz).

Ce filtrage garantit que seule la partie alternative du signal atteint la peau du patient ce qui améliore le confort, la sécurité et l'efficacité du traitement.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de détailler la mise en œuvre concrète de notre dispositif TENS depuis la sélection des composants électroniques jusqu'à leur intégration fonctionnelle. Grâce à la carte ESP32 et à sa capacité à générer des signaux analogiques via ses DAC, nous avons pu concevoir un système de stimulation modulable et contrôlable en temps réel. L'organigramme du programme combiné à l'utilisation de boutons poussoirs assure une interaction simple et efficace avec l'utilisateur pour ajuster les paramètres du signal.

L'étape d'amplification suivie du filtrage de la composante continue, garantit un signal propre et adapté à l'application thérapeutique. Ce travail prépare ainsi le terrain pour les tests pratiques et les validations expérimentales présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Applications et discussions des résultats

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'application pratique de notre système de stimulation électrique TENS. Le signal sinusoïdal est généré par l'ESP32. Puis passe par une étape d'amplification, suivie d'un filtrage destiné à supprimer la composante continue.

Dont la mise en marche (ON/OFF) est contrôlée par un bouton-poussoir. D'autres boutons permettent ensuite de moduler dynamiquement la fréquence, le temps d'application T (tapp), le temps de repos T (trepos) et le temps de traitement T (trait).

La discussion des résultats est faite en même temps que l'application pour analyser le fonctionnement du système à chaque étape.

1. visualisations de signal

1.1 Commande ON/OFF et adaptation du signal pour la stimulation TENS

Le bouton ON (broche GPIO21) déclenche la génération du signal sinusoïdal pour une durée prédéfinie (2 minutes) (figure 3.1).

Le bouton OFF (broche GPIO23) coupe immédiatement la sortie du DAC (figure 3.2).

Les réglages de fréquence, tapp, trepos, etc., ne sont pris en compte que si le signal est activé au préalable.



Figure 3.1 : Signal affiché après appui sur le bouton ON

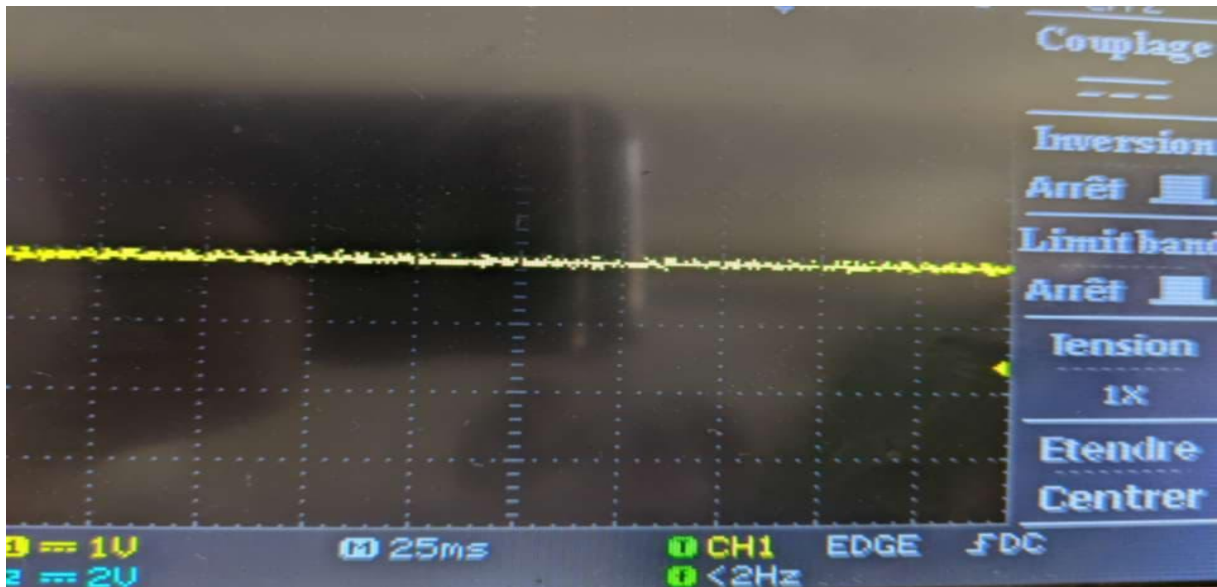


Figure 3.2 : Remise à zéro affiché après l'appui sur le bouton OFF

- **Filtrage et amplification du signal généré par le DAC**

En sortie du DAC (GPIO25), le signal brut présente une composante continue, visible sur le signal bleu. Ce décalage rend le signal incompatible avec la TENS, qui nécessite une onde symétrique pour éviter tout effet polarisant.

Un circuit d'amplification et de filtrage passe-haut corrige ce défaut en supprimant la composante continue et en augmentant l'amplitude. La figure 3.3 illustre cette amélioration

Signal jaune : signal brut en sortie directe du DAC

Signal bleu : signal corrigé, adapté à la stimulation TENS.

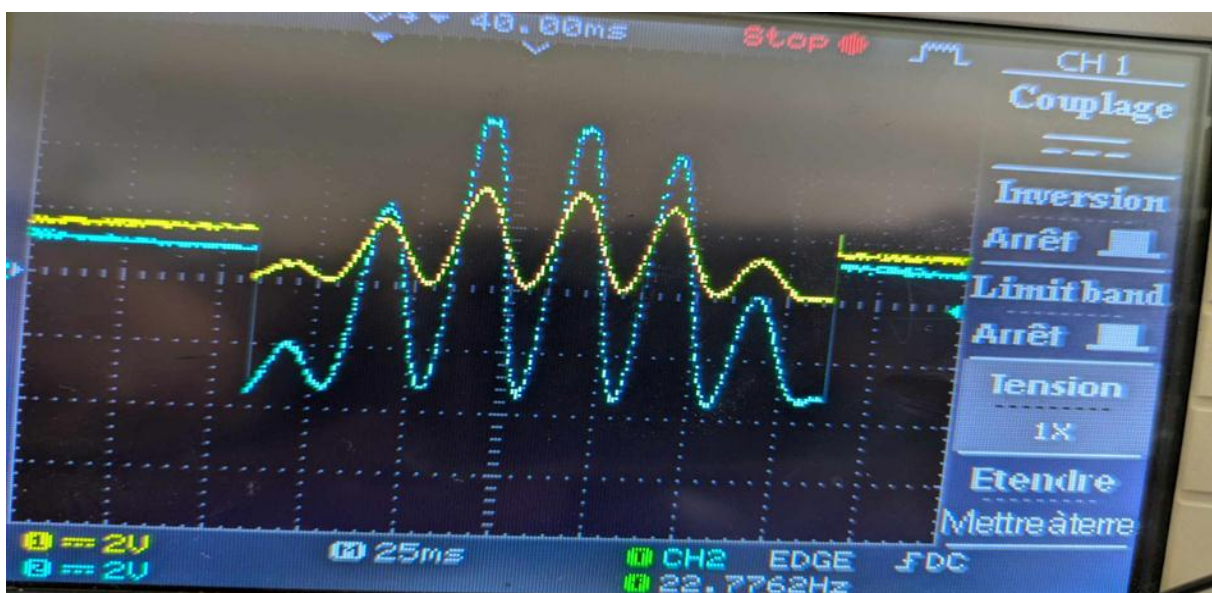


Figure 3.3 : Amélioration du signal DAC par amplification et filtrage.

- **Montée et descente progressive du signal**

Pour améliorer le confort du patient, le signal ne passe pas directement à pleine amplitude lorsqu'il est activé. Une phase de montée progressive ($T_{\text{montée}}$) est appliquée, pendant laquelle l'amplitude augmente petit à petit jusqu'à sa valeur maximale. De la même manière, avant l'arrêt du signal, une phase de descente (T_{descente}) réduit l'amplitude progressivement jusqu'à zéro.

Cette transition douce permet d'éviter les sensations brutales et rend la stimulation plus supportable. Elle est réalisée par le programme de l'ESP32, qui modifie progressivement les valeurs envoyées au DAC pour créer une rampe d'amplitude.

1.2 Variation de la fréquence du signal

A chaque pression sur le bouton GPIO13 la fréquence augmente, on observe alors une diminution de la période du signal (figure 3-4). À l'inverse, GPIO33 fait diminuer la fréquence ce qui est cohérent avec la relation inverse entre la fréquence et la période, comme illustré à la figure (figure 3-5).



Figure 3.4 : Signal généré après augmentation de la fréquence (pression sur le bouton GPIO13)

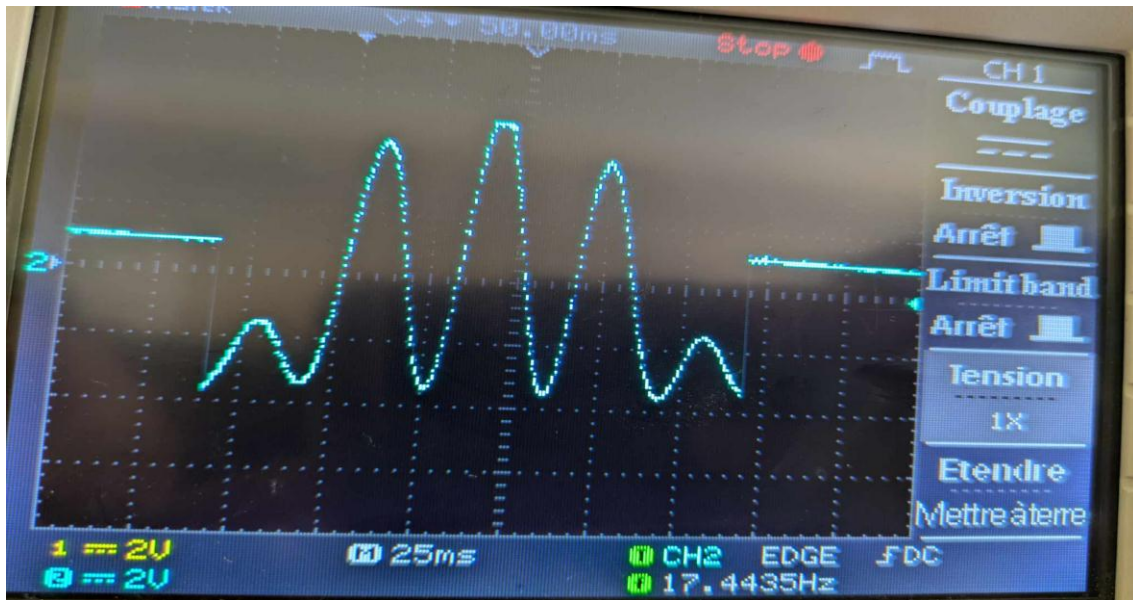


Figure 3.5 : Signal généré après la diminution de la fréquence (pression sur le bouton GPIO33)

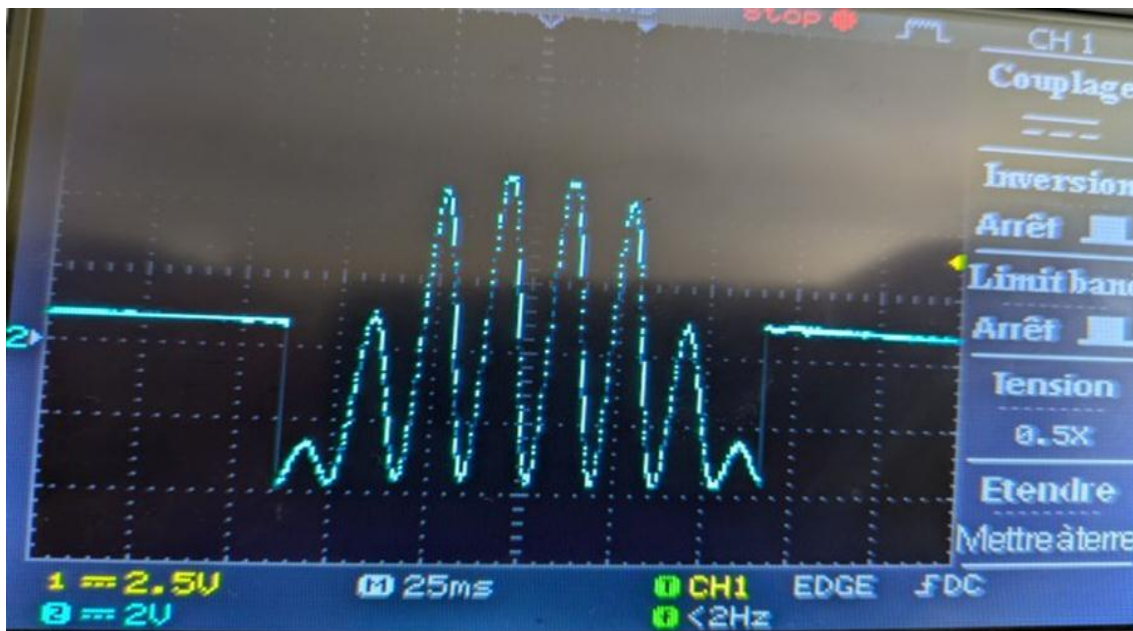


Figure 3.6 : Signal généré après augmentation de la fréquence (pression sur le bouton GPIO13)

1.3 Variation du temps d'application

À chaque pression sur le bouton GPIO32, la variable tapp augmente, allongeant le temps d'application du signal (figure 3-7). Inversement, le bouton GPIO12 le réduit en diminuant tapp (figure 3-8).

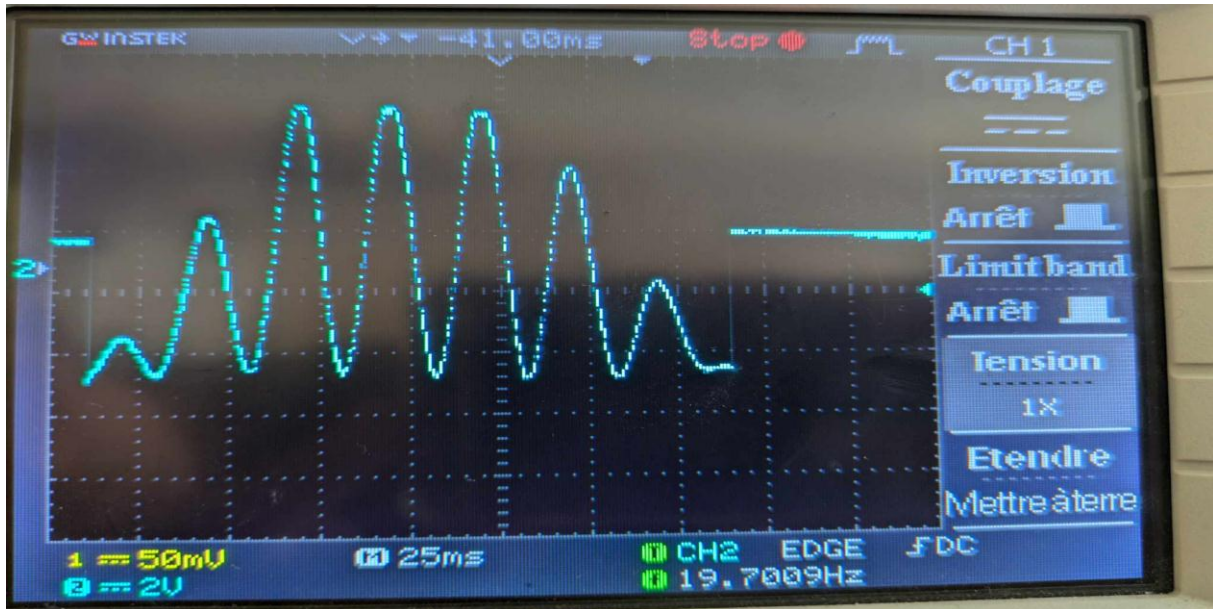


Figure 3.7 : Augmentation du temps d'application.



Figure 3.8 : Diminution du temps d'application.

1.4 Variation du temps de traitement (trait)

Le bouton GPIO26 augmente le temps de traitement jusqu'à 4 minutes (Figure 3-89) , tandis que GPIO27 le diminue jusqu'à un minimum de 1 minute (Figure 3-9).

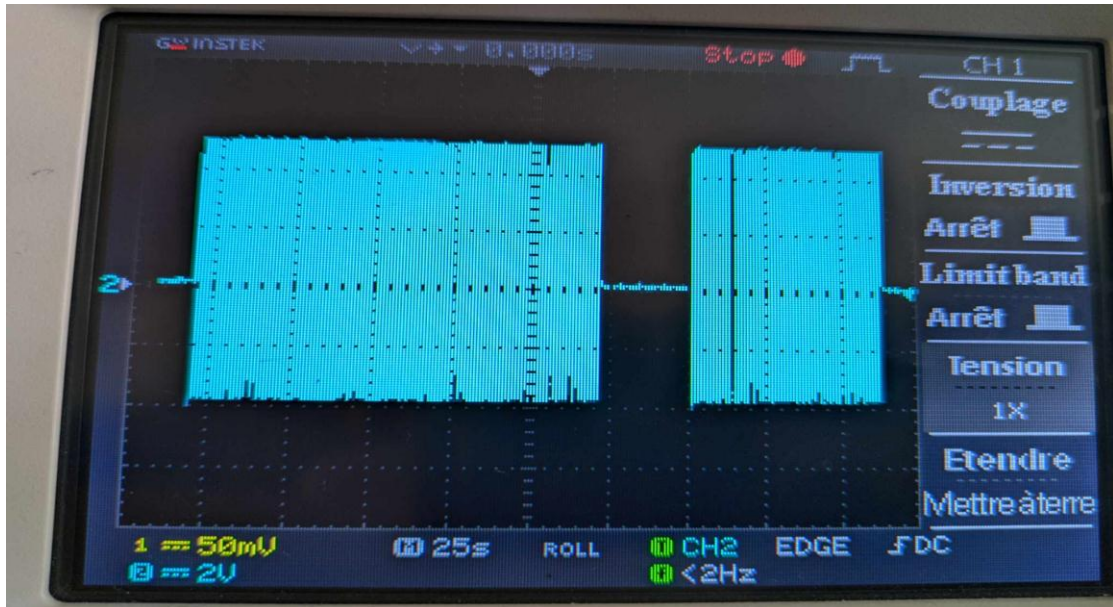


Figure 3.9 : Variation du temps de traitement

2. Discussions

Les résultats expérimentaux valident le bon fonctionnement du dispositif de stimulation électrique transcutanée (TENS) conçu. En effet, le système développé permet de générer un signal sinusoïdal avec des caractéristiques entièrement réglable, à savoir l'amplitude et la fréquence. Nous avons aussi le contrôle sur la durée d'application, de repos et de traitement. Ce qui nous permet d'adapter le signal appliqué pour chaque cas traité.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé l'application pratique de notre système de stimulation électrique TENS. À travers la génération d'un signal sinusoïdal par l'ESP32, son amplification, son filtrage, et la modulation des paramètres thérapeutiques via des boutons poussoirs, nous avons démontré la faisabilité et la performance de notre dispositif.

Les résultats obtenus confirment la stabilité du signal, la précision des réglages et la simplicité d'utilisation du système. L'ensemble des fonctionnalités ont été testées et validées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de concevoir et de mettre en œuvre un dispositif de stimulation électrique transcutanée (TENS), en alliant connaissances théoriques et application pratique.

Dans une première étape, nous avons abordé les généralités essentielles sur l'électrothérapie en mettant l'accent sur les bases neurophysiologiques et l'anatomie des muscles et nerfs impliqués dans la transmission de la douleur. Cette fondation théorique a permis de mieux comprendre les effets attendus de la stimulation TENS sur le corps humain.

Le deuxième chapitre a été consacré à la conception du système : de l'organigramme général à la génération du signal sinusoïdal via l'ESP32 en passant par les étapes d'amplification et de filtrage. Les paramètres clés de stimulation (fréquence, temps – d'application, repos et traitement) ont également été définis et rendus modulables à travers une interface simple via des boutons poussoirs.

Enfin, le dernier chapitre a permis de valider expérimentalement le bon fonctionnement du système. Les signaux obtenus ont été analysés en temps réel confirmant la qualité de l'amplification, la suppression de la composante continue ainsi que la flexibilité des réglages. Chaque variation a été visualisée et discutée attestant de la précision et de l'efficacité de notre dispositif.

Ainsi, ce projet démontre la possibilité de concevoir un stimulateur TENS à la fois fiable, accessible et personnalisable ouvrant la voie à des tests concrets en rééducation et en traitement de la douleur.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Gilbert, A., Carnot, P., & Nogier, T. (1917). *Physiothérapie. Tome I :Électrothérapie (2e éd.)*. Paris : J.-B. Baillièreetfils, 575 p.
- [2] Crépon, F. (2012). *Électrothérapie et physiothérapie : Applications en rééducation et réadaptation*. Paris : Elsevier Masson
- [3] Yahmed, M. B. (2012). Intérêt de l'électrostimulation transcutanée à visée antalgique par libération d'endorphines chez les patients opérés en chirurgie thoracique par thoracotomie postérolatérale (Mémoire de Master). Université de Nantes.
- [4] Melzack, R. & Wall, P. D. (1965). Pain mechanisms: a new theory. *Science*, 150(3699), 971–979.
- [5] Journal des Femmes – Santé. (2023, 6 juin). Électrostimulation : dangers, fonctionnement. Consulté en mai 2025 sur : <https://sante.journaldesfemmes.fr>
- [6] Wikipédia. (2025). Électrothérapie. Dans Wikipédia. Consulté en mai 2025, à l'adresse : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Électrothérapie>
- [7] Wikipédia. (2022). Stimulation musculaire électrique. Dans Wikipédia. Consulté en mai 2025, à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/Stimulation_musculaire_électrique
- [8] Césaro, P., Kéravel, Y., Ollat, H., Peschanski, M., & Sindou, M. (1993). *Neuroanatomie fonctionnelle : De la cellule aux comportements (Vol. I : Le neurone)*. Paris : ANNP.
- [9] Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2019). *Principes d'anatomie et de physiologie (14e éd.)*. Paris : De Boeck Supérieur.
- [10] EM- Consulte. (2009). Physiologie du nerf traumatisé [Article]. *EM- Consulte*, vol. 55 (S1), p. S13–S21.
- [11] Wikipédia. (2023). Nerf spinal. Dans Wikipédia. Consulté en mai 2025, à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nerf_spinal
- [12] Université Claude Bernard Lyon 1. (2020). Physiologie du muscle squelettique [Cours PDF]. Consulté en avril 2025.
- [13] EspressifSystems. (2023). ESP32 Series Datasheet [PDF]. Consulté en mai 2025, à l'adresse : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [14] Kushwah, R. S., & Sharma, A. (2019). "Arduinobased system design – A review". *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(10).

Bibliographie des figures

Résumé

Ce mémoire présente la conception d'un dispositif d'électrothérapie basé sur la technique TENS (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation), utilisée pour le soulagement non médicamenteux de la douleur. Le système repose sur une carte ESP32, qui génère un signal sinusoïdal modulé, suivie d'une phase de repos. Cette évolution douce du signal vise à améliorer le confort du patient.

Le signal est amplifié puis filtré par un circuit passe-haut pour supprimer la composante continue. Le fonctionnement du système est contrôlé par un bouton ON/OFF, et plusieurs boutons poussoirs qui permettent à l'utilisateur de régler les paramètres de stimulation : fréquence, temps d'application (Tapp), temps de repos (Trepos), et durée totale de traitement (Ttrait). Un écran d'affichage et un boîtier portable améliorent l'ergonomie du dispositif.

Les tests réalisés ont validé la génération d'un signal propre, réglable et adapté à l'électrothérapie. Ce projet offre une solution accessible et efficace pour les applications de rééducation fonctionnelle et de gestion de la douleur.

Abstract

This thesis presents the design of an electrotherapy device based on the TENS (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation), used for non-pharmacological pain relief. The system is based on an ESP32 board, which generates a modulated sinusoidal signal, followed by a rest phase. This gentle signal evolution aims to improve patient comfort.

The signal is amplified and then filtered by a high-pass circuit to remove the continuous component. The system is controlled by an ON/OFF button and several push buttons that allow the user to adjust the stimulation parameters: frequency, application time (Tapp), rest time (Trepos), and total treatment time (Ttrait). A display screen and portable case improve the ergonomics of the device.

Tests have validated the generation of a clean, adjustable signal suitable for electrotherapy. This project offers an accessible and effective solution for functional rehabilitation and pain management applications.

الملخص

تقدم هذه الأطروحة تصميم جهاز للعلاج الكهربائي يعتمد على تقنية (TENS) التنبيه الكهربائي العصبي عبر الجلد، المستخدمة لتخفيف الألم بدون أدوية. يعتمد النظام على بطاقة ESP32، التي تولد إشارة جيبية معدلة، تليها مرحلة راحة. يهدف هذا التطور السلس للإشارة إلى تحسين راحة المريض.

يتم تضخيم الإشارة ثم تصفيتها بواسطة دائرة تمرير عالية التردد لإزالة المكون المستمر. يتم التحكم في تشغيل النظام بواسطة زر تشغيل/إيقاف، والعديد من الأزرار التي تسمح للمستخدم بضبط معلمات التنبيه: التردد، وقت التطبيق (Tapp)، وقت الراحة (Trepos)، والمدة الإجمالية للعلاج (Ttrait). تحسن شاشة العرض والعلبة المحمولة من سهولة استخدام الجهاز.

أثبتت الاختبارات التي أجريت صحة توليد إشارة نظيفة وقابلة للتعديل ومناسبة للعلاج الكهربائي. يوفر هذا المشروع حلاً سهل الاستخدام وفعالاً لتطبيقات إعادة التأهيل الوظيفي وإدارة الألم.

Mots clés

Tens, Tapp, Ttraï, Trepos, Douleur, muscle, Nerf, Signal, courant, filtre, amplificateur, fréquence, ON, OFF ,DAC