

# Rapport de Projet :

## Fer à fileter à induction



Développeurs :

Mael BEGUET

Dorian FLACON

Client :

Yvan GIBERT

Tuteur :

Khalil EL KHAMLICHI DRISSI

EPROSE  
FRENCH LEATHER TOOL

CLERMONT  
AUVERGNE  
INP  
POLYTECH  
CLERMONT

## Résumé

Le projet a pour objectif de concevoir, pour la société EPROSE basée à Thiers (63), un fer à fileter fonctionnant selon le principe de l'induction, doté d'un système d'asservissement en température et d'un affichage de celle-ci. Cette initiative vise à moderniser le système actuel, dépourvu d'interface homme-machine (IHM) et d'asservissement, tout en remplaçant la charge résistive existante par une solution plus performante. L'objectif principal est d'améliorer des aspects essentiels tels que la consommation énergétique et le temps de montée en température. Le projet se déroule en trois grandes phases. La première consiste en une étude théorique approfondie sur le principe de l'induction et sur les moyens de générer, grâce à une bobine, le champ magnétique nécessaire pour chauffer une pièce métallique. La deuxième phase consiste à mettre en œuvre et valider, par différentes expérimentations, chaque composant indispensable pour concrétiser la partie théorique et répondre aux fonctionnalités définies dans le cahier des charges établi avec le client. Enfin, la dernière phase consiste à développer un prototype fonctionnel, permettant de passer des tests réalisés sur des platines d'expérimentation à des circuits imprimés intégrant toutes les fonctionnalités requises. Cette avancée représente une étape clé vers le développement d'un futur produit commercialisable.

**Mots-clés :** Induction, asservissement, interface homme-machine, onduleur à résonance.

## Abstract

The project aims to design, for the company EPROSE based in Thiers (63), a threading iron operating on the principle of induction, equipped with a temperature control system and a temperature display. This initiative seeks to modernize the current system, which lacks a human-machine interface (HMI) and control capabilities, while replacing the existing resistive load with a more efficient solution. The primary objective is to improve key aspects such as energy consumption and heating time. The project is carried out in three main phases. The first phase involves an in-depth theoretical study of the principle of induction and the methods to generate, using a coil, the magnetic field required to heat a metallic part. The second phase focuses on implementing and validating, through various experiments, each essential component to materialize the theoretical part and meet the functionalities defined in the specifications established with the client. Finally, the last phase involves developing a functional prototype, transitioning from tests conducted on experimental boards to printed circuits integrating all the required functionalities. This progress represents a key step toward developing a future marketable product.

**Keywords:** Induction, control, human-machine interface, resonant inverter.

## Remerciements :

Avant de commencer le développement de ce rapport, nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à notre client, Monsieur Yvan GIBERT, ainsi qu'à la société EPROSE, pour la confiance qu'ils nous ont témoignée tout au long de ce projet d'une durée d'un an et demi. Leur accueil chaleureux lors de notre visite au sein de leur entreprise, leur capacité à exprimer clairement leurs besoins et la qualité de leur accompagnement ont été des éléments clés dans la réussite de notre travail. Nous avons particulièrement apprécié leur collaboration, notamment grâce à la mise à disposition de socles en bois et de tiges en divers matériaux, indispensables à la réalisation de nos expérimentations. Leurs échanges, suggestions et propositions, toujours pertinentes malgré leur manque d'expertise dans le domaine du génie électrique, ont apporté une réelle valeur ajoutée à ce projet. Nous souhaitons également souligner leur disponibilité exemplaire, et tout particulièrement celle de Monsieur GIBERT, qui s'est montré présent à chaque revue, réactif dans ses réponses par mail et attentif aux questions liées au produit final à développer. Cette implication constante a considérablement contribué au bon déroulement du projet.

Nous souhaitons ensuite exprimer notre gratitude envers les deux tuteurs qui nous ont accompagnés tout au long de ce projet. Tout d'abord, nous remercions notre tuteur industriel, Monsieur Julian LAURENCE, pour son soutien précieux lors des différentes séances de tutorat. Il a été d'une grande aide pour préparer au mieux nos présentations lors des revues, et son accompagnement a été essentiel, tant dans la gestion du projet que sur certains aspects techniques. Nous remercions également Monsieur Khalil El KHAMLIHI DRISSI pour l'ensemble de ses conseils techniques, en particulier sur la partie électronique de puissance. Chacune de ses interventions lors des séances de projet nous a permis de réaliser des avancées significatives. Ses retours constructifs à la suite des revues ont également été déterminants pour nous orienter dans la bonne direction.

Nous remercions aussi nos deux professeures de communication, Madame Véronique QUANQUIN et Madame Myriam DOGHMI, qui, au cours de ces deux années, nous ont appris à rédiger des rapports de manière claire et structurée. Elles nous ont également entraînés à la communication orale, nous aidant à expliquer nos différents choix techniques de façon précise et compréhensible à nos interlocuteurs.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance à Monsieur Jacques LAFFONT, responsable des projets en génie électrique. Sa présence assidue à toutes les séances de projet, ainsi que ses explications, conseils et retours constructifs lors des revues, ont été d'une grande aide pour assurer le bon déroulement de ce projet.

## Table des matières

Résumé.....	1
Abstract.....	1
Remerciements : .....	2
Table des figures : .....	5
Glossaire :.....	6
Introduction : .....	7
1. Contexte du projet .....	8
1.1    Entreprise.....	8
1.2 Problématique.....	8
1.2.1 Solution actuelle .....	8
1.2.2 Solution envisagée .....	9
2. Organisation.....	10
2.1 Définition du cahier des charges.....	10
2.2 Détermination des tâches .....	10
2.4 Gantt et WBS.....	10
2.5 Outils utilisés .....	11
3. Travaux réalisés.....	12
3.1 Études Théoriques.....	12
3.1.1 Induction .....	12
3.1.2 Circuit résonant.....	12
3.1.3 Chauffe des matériaux .....	13
3.2 Simulation .....	14
3.3 Études Pratiques .....	15
3.3.1 Choix des Éléments de Commutation .....	15
3.3.2 Génération des Signaux de Commande .....	16
3.3.3 Dimensionnement de la Charge LC .....	17
3.3.4 Asservissement de le Température .....	18
3.3.5 Mesure de la Température .....	18
3.3.6 Interface Homme Machine .....	19

3.3.7 Expérimentations.....	20
4. Conception d'un Prototype.....	23
4.1 Conceptions CAO.....	23
4.2 Alimentation.....	26
5. Conclusion.....	27
5.1. Bilan .....	27
5.2 Perspectives .....	29
Bibliographie : .....	31
Table des annexes .....	I

## Table des figures :

Figure 1 : Solution actuelle .....	8
Figure 2 : Schéma de Principe de la Solution Envisagée .....	9
Figure 3 : Cahier des Charges.....	10
Figure 4 : WBS.....	11
Figure 5 : Induction .....	12
Figure 6 : Circuit Résonnant.....	13
Figure 7 : Amplitude du Courant Traversant la Bobine en Fonction de sa Fréquence .....	13
Figure 8 : Exemple de Chauffe à Induction .....	14
Figure 9 : Résultat de la simulation - Graphe 1 : Tension aux Bornes du circuit RLC ; Graphe 2 : Courant dans la Bobine.....	14
Figure 10: MOSFET IRLIZ14G.....	15
Figure 11 : Schéma de Fonctionnement Driver de Pont Complet (HIP4082).....	16
Figure 12:Carte de Développement TB-S3A6 .....	16
Figure 13:Exemple de MLI et de son Complémentaire.....	17
Figure 14:Principe Choisit d'Asservissement de la Température .....	18
Figure 15:Principe de Mesure de la Valeur de Résistance de la Thermistance .....	19
Figure 16:Schéma de Câblage de l'Écran LCD en Communication I2C.....	19
Figure 17 : Montage de Test sur Breadboard Complet.....	20
Figure 18:Signaux de Commande Générés .....	20
Figure 19:Signaux de Commande Pin 13-14 .....	21
Figure 20:Signaux de Commande Pin 10-16 .....	21
Figure 21:Resultat du Chauffage lors de l'Expérimentation sur Breadboard .....	21
Figure 22:Exemple d'Affichage de Consigne sur l'Ecran LCD .....	22
Figure 23:Circuit Imprimé du Circuit de Chauffe .....	23
Figure 24:Norme IPC-2152 sur la Section des Pistes en fonction du Courant les Traversants .....	24
Figure 25:Carte du Circuit de Chauffe.....	24
Figure 26:Resultat de la Capture de Température après la Conception CAO.....	24
Figure 27: Circuit Imprimé du Circuit de Captation et Réglage de la Température.....	25
Figure 28:Circuit Imprimé de l'Écran LCD .....	26
Figure 29:Alimentation à Découpage 300W .....	26
Figure 30 : Poids Total de L'Alimentation .....	27
Figure 31:Coût Total du Prototype .....	28
Figure 32:Exemple d'un Futur Châssis Possible .....	29
Figure 33:Exemple d'une IHM plus Moderne .....	30
Figure 34:Perspectives d'un Futur Produit Final.....	30

## Glossaire :

**Asservissement** : Un système asservi, ou un asservissement, est un système qui peut générer de manière autonome sa commande principale en se basant sur une valeur de référence et une mesure de la réponse obtenue à l'aide d'un capteur. L'objectif de ce système est de permettre à la grandeur commandée, la réponse, d'atteindre rapidement sa valeur de référence, en dépit des perturbations externes. Le principe fondamental de l'asservissement consiste à comparer la valeur de référence avec la mesure et à apporter les corrections nécessaires en conséquence.

**Induction** : Le principe de l'induction électromagnétique est que lorsqu'un conducteur est soumis à un champ magnétique variable, cela induit des courants dans le conducteur, également appelés courants de Foucault. Ce phénomène est notamment utilisé dans les plaques de cuisson pour générer de la chaleur, ainsi que dans les générateurs pour la transmission de courant.

**Interface homme-machine** : Une interface homme-machine (IHM) est l'ensemble des dispositifs matériels et logiciels qui permettent à un utilisateur humain d'interagir avec une machine.

## Introduction :

Les humains travaillent le cuir depuis l'époque des Néandertaliens, où il était utilisé comme abri contre la pluie ou le soleil. Les Grecs et les Romains ont ensuite industrialisé les techniques de fabrication, les Romains étant les premiers à l'utiliser pour fabriquer des chaussures et des vêtements.

Dans les temps moderne, le cuir est largement utilisé dans l'industrie textile. Il est utilisé pour fabriquer des vêtements, des sacs à main, des portefeuilles et une gamme variée d'accessoire. Le cuir est particulièrement prisé dans les secteurs du luxe et de l'ultra-luxe, où il est travaillé avec une précision exceptionnelle pour créer des produits uniques de très haute qualité.

Pour travailler ce cuir avec précision et produire des pièces de qualité, des outils de haute qualité et une grande précision sont nécessaires. Le fer à fileter est l'un de ces outils utilisés par les artisans du cuir en maroquinerie. Fabriqué en bois et doté d'une forme arrondie pour une prise en main optimale, il est équipé d'un embout métallique à l'extrémité qui permet de réaliser des motifs avec une grande précision. Il est principalement utilisé pour les finitions des pièces de maroquinerie, chauffé puis appliqué avec force sur le cuir, il permet de marquer les matériaux de manière précise.

## 1. Contexte du projet

### 1.1 Entreprise

L'entreprise à l'origine de ce projet est EPROSE, dirigée par son directeur général, Monsieur Yvan GIBERT. Basée à THIERS (63), cette entreprise se spécialise dans la fabrication d'outils pour le travail du cuir. Elle conçoit et propose des outils de grande qualité qui garantissent une exécution rapide, une sécurité accrue et un confort d'utilisation optimale. EPROSE travaille en partenariat avec les plus grandes marques de textiles de luxe et d'ultra-luxe, mais elle réalise également des pièces et des outils pour des secteurs totalement différents, tels que le médical ou pour des particuliers.



### 1.2 Problématique

#### 1.2.1 Solution actuelle

Actuellement, les fers à fileter proposés par EPROSE sont ceux illustrés dans la [figure 1](#).



*Figure 1 : Solution actuelle*

Les fers à fileter actuels présentent plusieurs inconvénients. Ils chauffent grâce à un système résistif qui fait passer un fort courant dans une résistance pour chauffer la lame. Ce système utilise des potentiomètres pour régler la température, mais il ne fournit pas de retour à l'utilisateur, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'affichage de la température ni de notification lorsque

le fer est chaud. En conséquence, les utilisateurs ajustent la température en fonction de leur expérience, ce qui manque de précision, et le manque d'avertissement de la chaleur rend le produit dangereux.

### 1.2.2 Solution envisagée

La solution envisagée implique l'utilisation d'un système de chauffage de lame basé sur l'induction. L'inducteur sera intégré dans le manche du fer, permettant ainsi un chauffage efficace de la lame en étant au plus près de celle-ci. De plus, un capteur de température sera placé près de la lame pour fournir un retour précis sur la température, facilitant ainsi une régulation précise.

En parallèle, notre solution comprendra une interface homme-machine (IHM) comportant des LED qui s'allumeront lorsque le fer aura atteint la température désirée, ainsi que des indications visuelles pour signaler lorsque le fer est chaud afin d'éviter les brûlures. Un affichage de la température sera également intégré, accompagné d'un système de réglage permettant de modifier cette dernière à l'aide d'un potentiomètre. De plus, notre système comprendra un mode veille permettant de maintenir la lame à une température sécuritaire pour les utilisateurs tout en préservant les lames et en réduisant la consommation d'énergie par rapport au système actuel.

Une représentation du système envisagé est disponible dans la figure 2 :

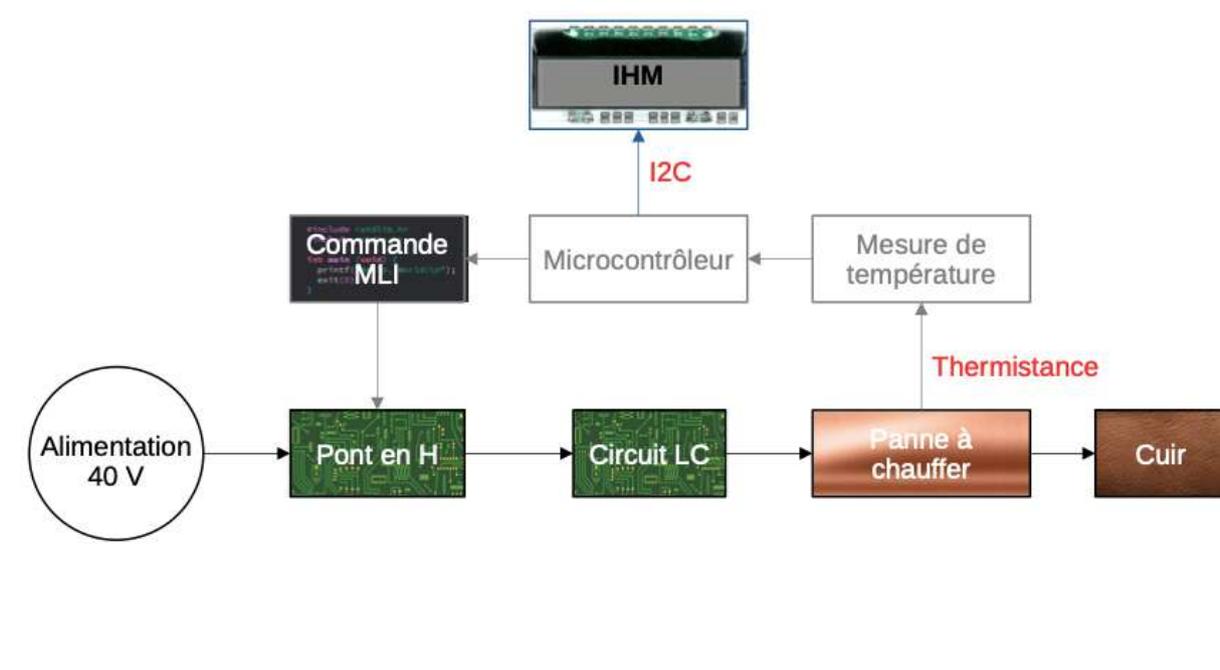


Figure 2 : Schéma de Principe de la Solution Envisagée

Ce schéma de principe (figure2) représente clairement les trois grandes parties de notre projet. Il intègre la partie puissance, avec le circuit de chauffe, le pont de transistors et le circuit LC résonant. Il inclut également la régulation de température, qui comprend les capteurs, le système d'asservissement et la commande de la partie puissance. Enfin, il met en avant l'interface homme-machine (IHM), permettant l'affichage de la température et les interactions utilisateur nécessaires au réglage.

## 2. Organisation

### 2.1 Définition du cahier des charges

Ce projet étant nouveau, il est essentiel de rédiger le cahier des charges ([figure3](#)) dans son intégralité. Pour ce faire, plusieurs étapes ont été suivies. Tout d'abord, une visite de l'entreprise a été effectuée et le client a été consulté pour définir ses attentes précises. Cela a permis d'amorcer la rédaction du cahier des charges en ce qui concerne les fonctionnalités du prototype à développer. Ensuite, grâce à la participation active du client lors des revues et des discussions, le cahier des charges a pu être amélioré et est désormais complet.

No	Nature	Niveau	Flexibilité
F1	Chauffage par induction	60-200 °C	
F2	Asservir la température	60-200 °C	4°C
F3	Afficher la température	0-200°C	
F4	Branchement sur une prise secteur standard 230 V		
C1	Temps de montée en température	10 secondes	
C2	Poids du manche	<250 gr (avec système)	
C3	Consommation	<120 VA	
C4	Volume réduit et portable	Poids:<=4300 gr Volume<=215x185x75mm	
C5	Pas d'obstruction de la visibilité		
C6	Budget	<400 € (Partie induction)	

Figure 3 : Cahier des Charges

### 2.2 Détermination des tâches

À la suite de la visite de l'entreprise et de la réunion avec le client concernant le prototype final à réaliser, une liste des tâches à accomplir pour sa conception a été établie :

#### 2.4 Gantt et WBS

Pour le Gantt et les tâches à effectuer en 4A (voir [annexe 1](#)), la décision a été prise de se concentrer sur les différents aspects théoriques du projet, sur la rédaction d'un cahier des charges, et sur la simulation des parties théoriques, notamment la simulation du circuit résonant avec le dimensionnement des composants effectué.

Le Gantt prévu en 5A (voir [annexe 2](#)) s'inscrira dans la continuité du travail amorcé en 4A. La première étape consistera à valider le dimensionnement déjà réalisé, en s'appuyant sur une grande phase dédiée dans le Gantt de 5A. Cette phase inclura la conception du circuit de chauffe sur des planches de test. Une fois le circuit validé et les composants correctement sélectionnés, nous pourrons procéder à sa modélisation en CAO. La deuxième étape portera sur la captation de température et l'asservissement. Cela impliquera le choix du capteur, son intégration, ainsi que le développement de l'asservissement au niveau logiciel. Enfin, la troisième étape concernera l'interface homme-machine (IHM), avec la sélection de l'afficheur et le développement de son programme pour répondre aux exigences du cahier des charges. Le projet se conclura par un test final, permettant de valider le bon fonctionnement simultané de toutes les parties développées.

Le [WBS](#) a été structuré en s'appuyant sur les trois grandes parties développées dans le Gantt :

Circuit LC (résonant) : Cette section inclut la conception, les tests et la modélisation en CAO du circuit.

Régulation de la température : elle comprend le choix des composants, la programmation du capteur et le développement de l’asservissement thermique.

Interface homme-machine (IHM) : cette partie couvre la sélection de l’afficheur et le développement de son programme conformément aux exigences du projet.

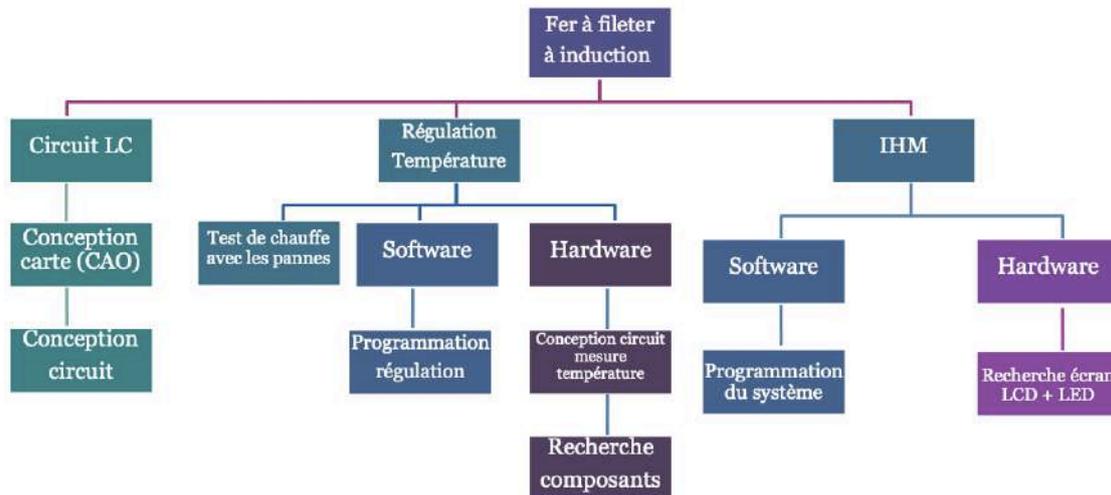


Figure 4 : WBS

## 2.5 Outils utilisés

Pour l'organisation, les outils utilisés, notamment pour créer le WBS et le Gantt, est le logiciel Project Libre. Grâce à la liste des tâches préalablement indiquées, ce logiciel permet de réaliser un diagramme de Gantt et de générer automatiquement un WBS.

Pour représenter le WBS de manière plus visible que celui généré par le logiciel Project Libre, les outils du pack office sont utilisés. Ces outils permettent de créer un WBS plus visible et présentable, facilitant ainsi la visualisation des différentes étapes du projet.

### 3. Travaux réalisés

#### 3.1 Études Théoriques

##### 3.1.1 Induction

L'induction, principe fondamental en électromagnétisme, joue un rôle central dans diverses applications technologiques et dans notre quotidien. Découverte par Michael Faraday au début du 19ème siècle, l'induction décrit le phénomène de génération d'une force électromotrice (FEM) dans un conducteur lorsqu'il est exposé à un champ magnétique en mutation [1]. Ce principe est à la base du fonctionnement des transformateurs, des moteurs électriques, des générateurs et des systèmes de recharge sans fil, entre autres. Comprendre les principes de l'induction électromagnétique est crucial pour concevoir des systèmes électriques efficace et exploiter l'énergie électromagnétique pour diverses applications. Ce rapport vise à explorer le concept d'induction électromagnétique, ses principes sous-jacents, ses applications pratiques et ses perspectives.

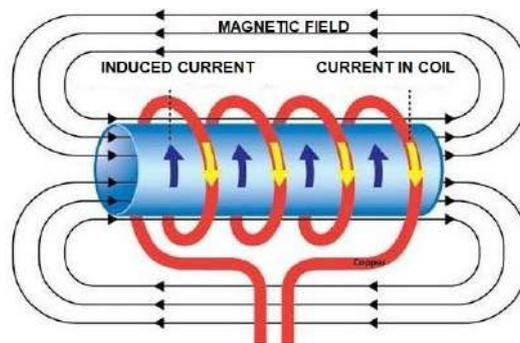


Figure 5 : Induction [2]

Dans la [figure 5](#), on peut observer qu'en faisant passer un courant alternatif à travers la bobine, on crée un champ magnétique tournant autour de la pièce à chauffer. Ce champ magnétique génère un courant, appelé courant induit, dans la pièce. Grâce à la résistance électrique de la pièce, ce courant induit entraîne une dissipation d'énergie sous forme de chaleur, ce qui permet de chauffer efficacement la pièce.

##### 3.1.2 Circuit résonant

Les circuits résonants sont des composants essentiels dans de nombreux systèmes électroniques et électriques. Ils exploitent le phénomène de résonance, qui se produit lorsqu'un système réagit de manière particulière à une certaine fréquence de stimulation. Cette réaction peut entraîner une amplification du signal à cette fréquence ou une sélectivité accrue pour cette fréquence par rapport aux autres.

Les circuits résonants ([figure 6](#)) sont généralement constitués d'éléments tels que des inductances (dans notre cas, une bobine utilisée pour chauffer) et des condensateurs. Dans ce circuit RLC, la charge résistive R correspond à l'élément à chauffer. Le circuit est piloté à la fréquence souhaitée, correspondant à la fréquence de résonance, grâce à un pont complet de MOSFET. Ce dernier permet d'appliquer une tension de +E ou -E (avec E tension d'alimentation du bus continu) aux bornes du circuit RLC série. En commutant le pont à la bonne fréquence, il devient ainsi possible de fonctionner en résonance.

En mode résonance, c'est-à-dire lorsque la commutation se fait à la fréquence de résonance, on remarque dans la [figure 7](#) que le courant traversant la bobine atteint son amplitude maximale. Par conséquent, le champ magnétique généré par ce courant sera également maximal. Ainsi, les courants induits dans la pièce, comme expliqué précédemment, seront également maximaux. Cela entraîne une

dissipation d'énergie sous forme de chaleur qui sera elle aussi maximale. L'intérêt de se rapprocher le plus possible de cette fréquence de résonance est donc primordial, car à cette fréquence, l'échange d'énergie est optimal, ce qui permet un chauffage plus rapide et plus efficace.

On rappelle que le fréquence résonance s'écrit comme suit :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

Avec :

$f_r$  : Fréquence de résonance

L : Valeur de l'inductance de la bobine en Henry (H)

C : Valeur de la capacité du condensateur en Farad (F)

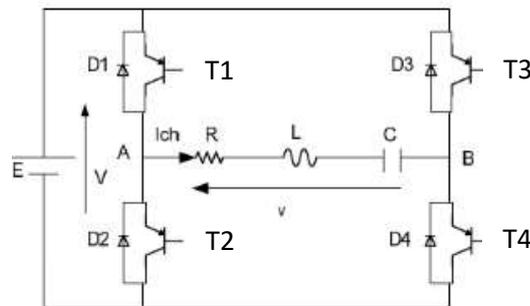


Figure 6 : Circuit Résonnant [4]

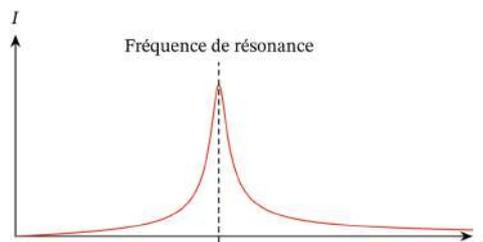


Figure 7 : Amplitude du Courant Traversant la Bobine en Fonction de sa Fréquence [5]

### 3.1.3 Chauffage des matériaux

Le chauffage par induction utilise des courants électriques induits pour générer de la chaleur dans des matériaux conducteurs. Un champ magnétique alternatif est produit par une bobine alimentée en courant alternatif haute fréquence. Ce champ induit des courants électriques, appelés courants de Foucault, à l'intérieur du matériau, générant de la chaleur par effet Joule en raison de la résistance du matériau. Ce processus est largement utilisé dans l'industrie pour diverses applications telles que le brasage, la fusion, et le traitement thermique des métaux en raison de sa rapidité, de son contrôle précis de la température et de son efficacité énergétique.

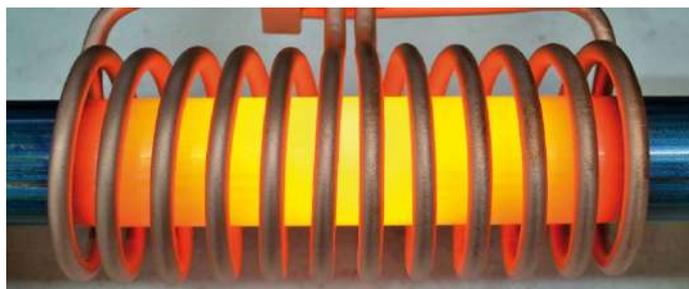


Figure 8 : Exemple de Chauffe à Induction [3]

Pour calculer l'énergie nécessaire pour chauffer une pièce à une température souhaitée, on utilise la formule suivante :

$$Q = m . c . dT$$

Avec :

Q : Quantité d'énergie nécessaire (en Joule)

m : Masse de matière (en Kg)

c : Capacité thermique massique (en J/(Kg.°C))

dT: delta de température (en °C)

### 3.2 Simulation

Pour simuler le circuit résonant, MATLAB Simulink a été utilisé. Ce logiciel est largement utilisé pour créer et tester des modèles de systèmes. Avec une interface facile à comprendre, il permet de construire des modèles en utilisant des blocs pour représenter les parties du système et en les reliant avec des lignes. On peut simuler toutes sortes de systèmes, comme des circuits électriques ou des machines, et voir comment ils fonctionnent dans différentes situations.

Le schéma de simulation est disponible en [annexe 3](#) :

Le résultat de la simulation est comme suivant :

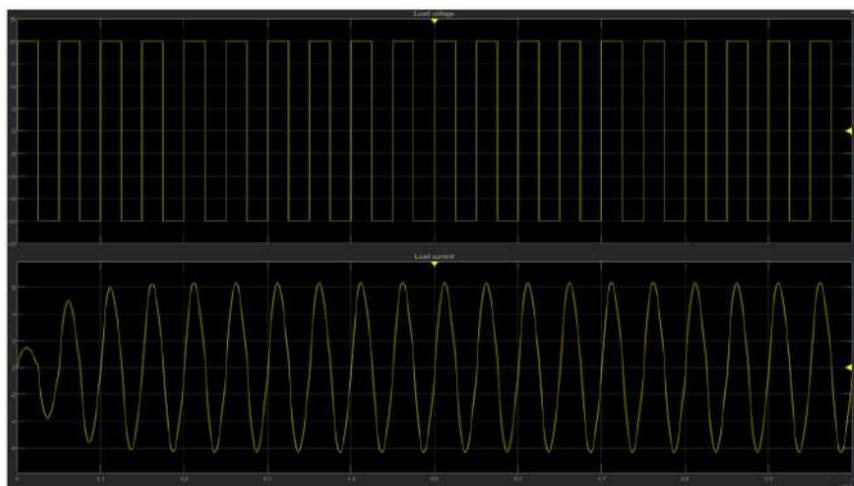


Figure 9 : Résultat de la simulation - Graphe 1 : Tension aux Bornes du circuit RLC ; Graphe 2 : Courant dans la Bobine

On remarque que les résultats montrent bien un signal en créneaux de +E ou -E aux bornes de la charge RLC, comme prévu (voir partie [circuit résonant](#)). De plus, lors de cet essai à la fréquence de résonance, le courant dans la bobine présente une forme très proche d'un signal alternatif sinusoïdal, avec des amplitudes très élevées.

### 3.3 Études Pratiques

Dans cette étude pratique, nous validerons, étape par étape, les différentes phases de conception d'un prototype de fer à fileter, en nous appuyant sur la partie théorique développée ainsi que sur les besoins définis dans le cahier des charges.

#### 3.3.1 Choix des Éléments de Commutation

Dans la [figure 6](#), on peut observer que, dans le circuit résonant, la charge LC est pilotée par un pont de transistors composé de quatre transistors et de quatre diodes en antiparallèle. Pour la phase de test du prototype, il a été décidé de surdimensionner les éléments de commutation afin d'éviter toute limitation lors des essais ultérieurs, notamment lorsque la montée en puissance sera nécessaire pour chauffer les pannes. Ainsi, des MOSFET de marque VISHAY (référence : IRLIZ14G) [\[6\]](#) ont été sélectionnés. Ces MOSFET sont capables de commuter à des fréquences élevées tout en gérant des puissances importantes. De plus, comme indiqué dans la [figure 10](#), ces composants intègrent déjà des diodes en antiparallèle, ce qui simplifie la conception en évitant d'ajouter ou de dimensionner des diodes supplémentaires.

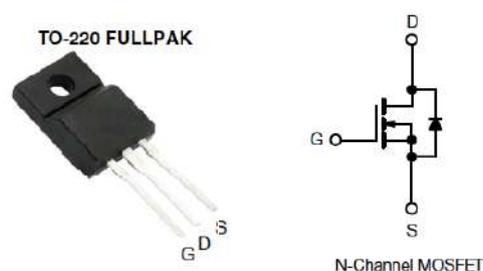


Figure 10: MOSFET IRLIZ14G

Une fois les MOSFET correctement dimensionnés, il est essentiel de les faire commuter de manière appropriée et à la bonne fréquence. Dans ce cas, comme illustré dans la [figure 7](#), la commutation doit se faire à la fréquence de résonance du circuit. Par ailleurs, les quatre éléments de commutation sont disposés en pont complet, ce qui nécessite une commutation en diagonale pour assurer le bon fonctionnement du système. Cela signifie que T1 et T4 doivent commuter simultanément, de même que T2 et T3 (voir [figure 6](#)). Cette configuration permet de générer la tension nécessaire aux bornes de la charge, soit une alternance de +E et -E (E étant la tension du bus continu), à la fréquence souhaitée. Cela correspond aux résultats observés sur le premier graphe de la simulation ([graphe 1](#)).

Pour accomplir cette tâche, il est crucial de fournir une tension adaptée pour commander les grilles des MOSFET à la fréquence souhaitée, tout en évitant les courts-circuits susceptibles de survenir en cas de commutation simultanée des éléments sur une même branche. C'est pourquoi l'utilisation d'un driver de pont complet a été choisie.

Le driver de pont complet sélectionné est un modèle de la marque Renesas (référence : HIP4082) [7]. Son schéma de fonctionnement est présenté ci-dessous :

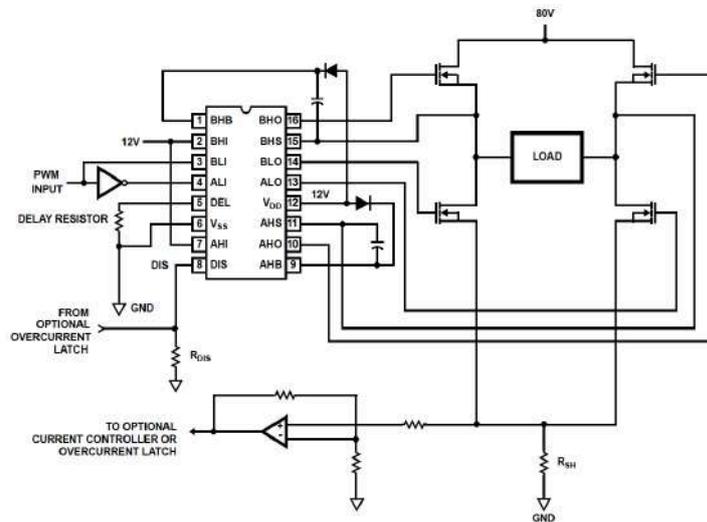


Figure 11 : Schéma de Fonctionnement Driver de Pont Complet (HIP4082)

Ce driver comporte 16 broches. La broche 3 sert d'entrée pour le signal de commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion) à la fréquence souhaitée, tandis que la broche 4 reçoit le signal complémentaire. Les broches de sortie 10, 13, 14 et 16 délivrent les signaux de commande avec la tension nécessaire pour activer les grilles des MOSFET, assurant leur commutation dans le bon ordre.

Pour éviter tout problème de court-circuit, un délai est introduit grâce à une résistance connectée à l'entrée de la broche 5. Cela garantit que les éléments sur une même branche ne commutent pas simultanément.

En conclusion, ce driver permet de faire commuter la charge en toute sécurité, sans risque de court-circuit, sur une large plage de fréquences et avec une grande précision à la fréquence souhaitée. Cette étape constitue un point clé pour la suite du projet.

### 3.3.2 Génération des Signaux de Commande

Les signaux de commande seront générés par voie logicielle à l'aide d'un microcontrôleur Renesas de la série S3A6, intégré sur la carte de développement TB-S3A6 [8].

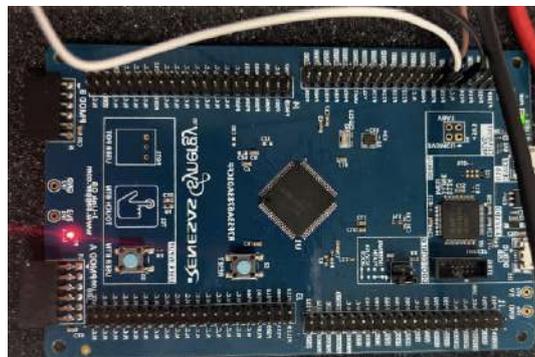


Figure 12: Carte de Développement TB-S3A6

Le choix de générer les signaux de commande par voie logicielle découle de la nécessité d'asservir la température de chauffe. Grâce au code, il sera possible d'ajuster les signaux de commande des éléments de commutation afin de réguler la température.

Les signaux de commande consisteront en deux signaux MLI complémentaires avec un rapport cyclique de 50 % et une fréquence égale à la fréquence de résonance. Ces deux signaux seront directement injectés en entrée du driver, qui pilotera ensuite les quatre MOSFET comme expliqué précédemment. Un exemple de signal MLI et de son complémentaire est présenté ci-dessous.

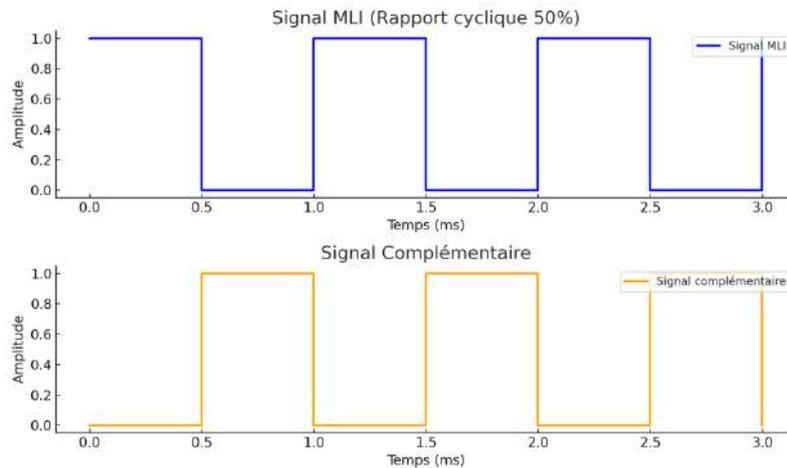


Figure 13: Exemple de MLI et de son Complémentaire

### 3.3.3 Dimensionnement de la Charge LC

Pour le dimensionnement de la charge, nous avons rencontré deux problématiques :

1. La première consiste à éviter de commuter à une fréquence située dans le domaine audible, car cela pourrait générer des bruits de commutation désagréables pour l'utilisateur. Cela impose donc une fréquence  $fr > 20 \text{ KHz}$
2. La seconde contrainte est liée à la taille de la bobine, qui doit être suffisamment compacte pour s'insérer dans le manche du fer, au niveau de l'embout à chauffer, sous la panne.

Pour répondre à ces contraintes, nous avons commencé par enrouler un fil de cuivre autour de l'embout à chauffer, en essayant d'ajouter autant de spires et de couches que possible afin de maximiser le champ magnétique, tout en respectant les dimensions du manche. Cette méthode a permis d'obtenir une inductance de  $L = 80 \mu\text{H}$ .

Il nous restait alors à dimensionner le condensateur C de manière que la fréquence de résonance, utilisée pour la commutation des éléments, reste en dehors du domaine audible. Nous avons opté pour un condensateur de  $C = 330 \text{ nF}$

En appliquant la [formule](#) vue précédemment, la fréquence de résonance obtenue est :

$$fr = 31 \text{ KHz} > 20 \text{ KHz}$$

Ainsi, cette configuration respecte les contraintes à la fois de fréquence et de taille.

### 3.3.4 Asservissement de le Température

Comme défini dans le cahier des charges, une des tâches principales de notre projet est d'asservir la température avec une flexibilité de  $\pm 4$  °C.

L'asservissement sera réalisé de manière logicielle à l'aide du microcontrôleur, qui sera utilisé pour générer les signaux de commande. Le principe est le suivant :

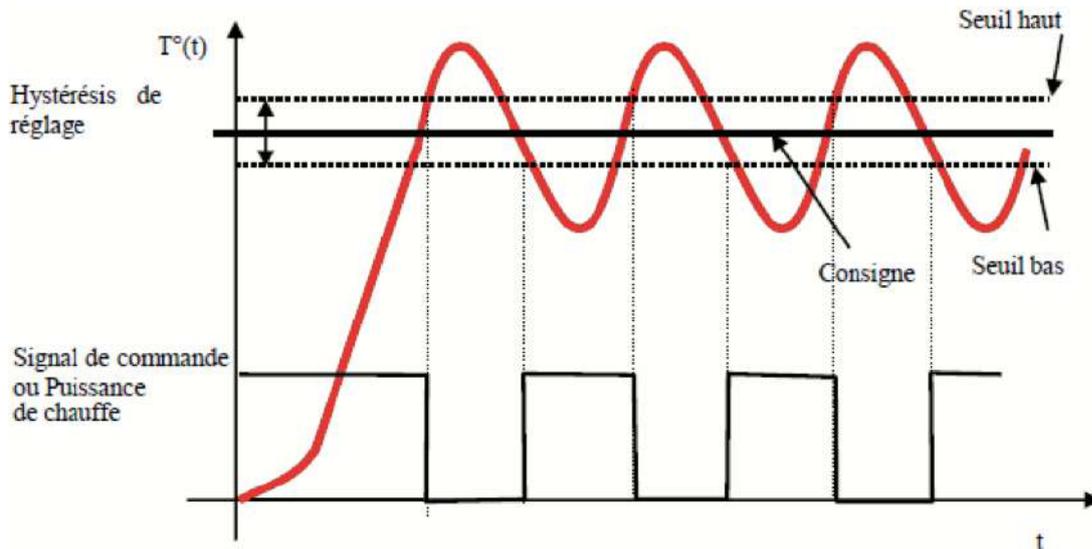


Figure 14:Principe Choisit d'Asservissement de la Température [9]

Le principe repose sur l'inertie thermique de la panne à chauffer. En effet, les différentes expérimentations montrent que la panne retient bien la chaleur une fois chauffée. Ainsi, le principe d'asservissement est simple : nous chauffons rapidement (en moins de 10 secondes) à puissance maximale jusqu'à atteindre le seuil haut d'hystérésis, c'est-à-dire la  $T_{desirée} + 1^{\circ}C$ . Une fois ce seuil atteint, nous coupons les signaux de commande jusqu'à ce que la température redescende en dessous du seuil bas, défini comme la  $T_{desirée} - 1^{\circ}C$ . Ce temps de descente est relativement long (de l'ordre de la minute), car la panne conserve efficacement la chaleur. Une fois le seuil bas dépassé, nous réactivons la puissance maximale pour faire remonter la température au-dessus du seuil haut en quelques secondes. Ce cycle se répète tout au long de l'utilisation, permettant ainsi à la panne de rester en moyenne autour de la température désirée, tout en respectant les contraintes de flexibilité.

### 3.3.5 Mesure de la Température

La mesure de la température est effectuée à l'aide d'une thermistance, un composant électronique dont la résistance varie en fonction de la température. Cette variation est décrite par la formule suivante :

$$R(T) = R_{25} \times e^{\left(\beta \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{273+25}\right)\right)}$$

Avec  $R_{25}$  et  $\beta$  deux constantes données par le constructeur.

Grâce à cette formule, nous pouvons déterminer la valeur de la résistance pour toutes les températures situées dans la plage de mesure. Pour obtenir la valeur réelle de la résistance, nous utilisons le microcontrôleur. Celui-ci fournit une sortie à 3,3 V, utilisée pour créer un pont diviseur de tension composé d'une résistance fixe R1 (de valeur connue) et d'une résistance variable R2 qui correspond à notre thermistance, comme illustré dans le schéma suivant :

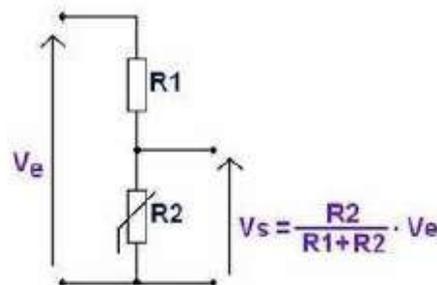


Figure 15: Principe de Mesure de la Valeur de Résistance de la Thermistance

Grâce au convertisseur analogique-numérique (CAN) intégré au microcontrôleur, nous mesurons la tension Vs au point central du pont diviseur. En appliquant la formule du pont diviseur, il devient alors facile de calculer la valeur de R2 correspondant à la thermistance, et ainsi de déterminer la température, comme expliqué précédemment.

### 3.3.6 Interface Homme Machine

L'interface homme-machine (IHM) sera utilisée pour régler et observer la température souhaitée. De plus, grâce à une LED, elle avertira l'utilisateur lorsque le produit atteint la température définie.

Pour régler la température, nous utilisons un potentiomètre, qui fonctionne selon le même principe que la thermistance vue précédemment. En effet, le potentiomètre peut être considéré comme une résistance variable. Comme dans le schéma de la [figure 15](#), nous récupérons la valeur de la résistance à l'aide de la formule du pont diviseur, puis nous mesurons la tension Vs avec une entrée du convertisseur analogique-numérique (CAN). Grâce à un code en langage C, chaque valeur de Vs correspondra à un changement de température de consigne.

Une fois cela fait, il est nécessaire d'afficher la température. Il a donc été décidé d'utiliser un afficheur LCD fonctionnant en communication I2C.

Son schéma de câblage est le suivant :

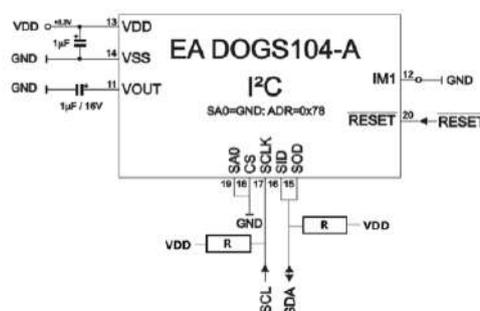


Figure 16: Schéma de Câblage de l'Écran LCD en Communication I2C [\[10\]](#)

### 3.3.7 Expérimentations

Une fois toutes ces études théoriques et pratiques réalisées, des expérimentations sur breadboard ont pu être menées afin de valider, une par une, les différentes études et de tester les différentes parties, séparément ou en ensemble.

Voici une photo du montage complet réalisé sur breadboard :

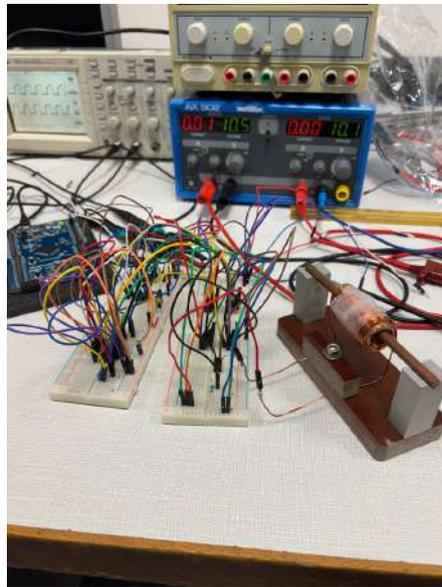


Figure 17 : Montage de Test sur Breadboard Complet

#### 3.3.7.1 Résultats

##### Génération des signaux de commande :

Grâce au microcontrôleur et à un programme écrit en langage C, nous pouvons générer un signal de modulation de largeur d'impulsion (MLI) ainsi que son signal complémentaire, en sortie de deux broches du microcontrôleur.

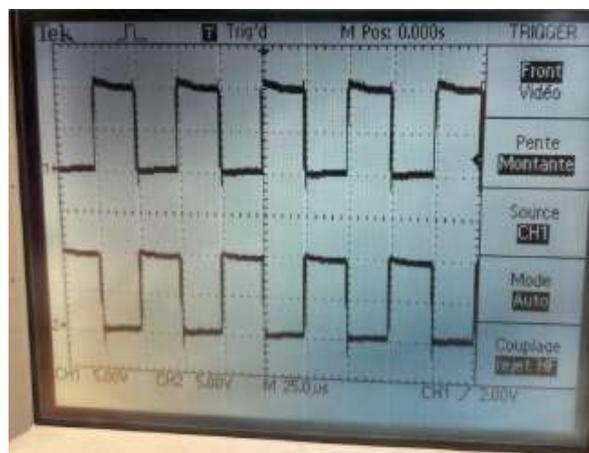


Figure 18: Signaux de Commande Générés

### Fonctionnement du driver :

En réalisant le câblage illustré dans la [figure 11](#), nous obtenons les quatre signaux de commande en sortie du driver. Ces signaux sont ensuite envoyés vers les quatre grilles du pont de MOSFET.

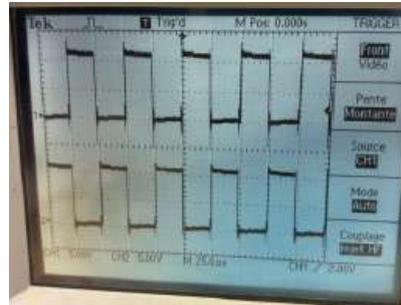


Figure 19: Signaux de Commande Pin 13-14

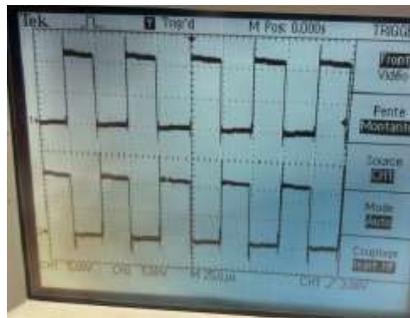


Figure 20: Signaux de Commande Pin 10-16

On observe que nous récupérons bien deux paires de signaux complémentaires, une pour chaque branche du pont. On remarque également la présence d'un temps mort entre les deux signaux d'une même paire, ajouté intentionnellement comme expliqué dans la partie précédente.

### Chauffe de matériaux :

Une fois toutes les parties finalisées, il ne reste plus qu'à vérifier la théorie sur le chauffage par induction. Cela consiste à générer des signaux de commande aussi proches que possible, voire égaux, à la fréquence de résonance calculée, afin de vérifier si une tige métallique peut être chauffée.

Le résultat est le suivant :



Figure 21: Resultat du Chauffage lors de l'Expérimentation sur Breadboard

On observe que nous parvenons à chauffer le métal, ce qui valide l'ensemble des parties précédentes. Grâce à ce travail, nous avons prouvé la faisabilité d'un tel projet, constituant ainsi une avancée majeure pour la suite.

Cependant, nous constatons que la température du fer n'atteint que 35,5 °C, bien en deçà de la plage de température demandée dans le [cahier des charges](#), qui est de 60 à 200 °C. Cela est dû à une limitation de la puissance de chauffe, imposée par les équipements de test. En effet, les breadboards et les câbles utilisés pour les expérimentations sont conçus pour de faibles courants. Or, pour atteindre des températures élevées rapidement, un courant et une tension plus importants sont nécessaires. Il devient donc impératif de passer à la phase de conception du prototype complet, avec des conceptions CAO. Cela nous permettra de gérer un courant et une tension plus élevés, et ainsi de répondre aux exigences du cahier des charges.

### **Asservissement de la température :**

Nous avons pu tester que, maintenant que nous parvenons à chauffer les métaux, notre asservissement et notre IHM fonctionnent correctement. Nous avons donc entré une consigne grâce à notre potentiomètre, et nous pouvons observer cette consigne sur l'afficheur LCD, comme le montre la photo ci-dessous :

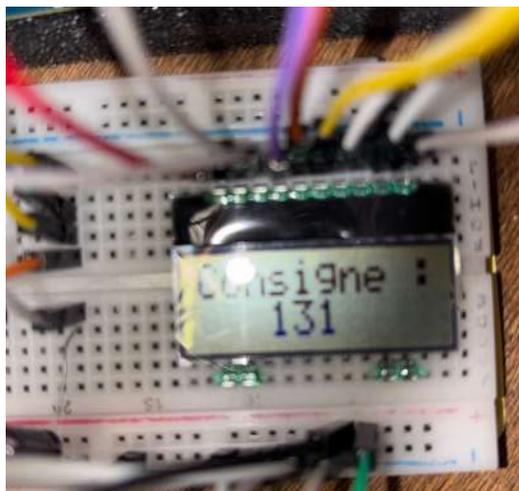


Figure 22: Exemple d'Affichage de Consigne sur l'Ecran LCD

Une fois la consigne affichée, nous avons pu tester et valider notre asservissement. En effet, une fois la valeur de consigne atteinte, les signaux de commande se sont coupés, puis se sont réactivés correctement lorsque cela était nécessaire, en fonction des seuils d'hystérésis. Cette procédure a été vérifiée à l'aide d'une caméra thermique, ce qui a confirmé que la mesure et l'asservissement se déroulaient correctement. Cela représente également une grande avancée pour le projet, car cela valide une partie du [cahier des charges](#), qui consistait à asservir, afficher et contrôler la température de consigne de manière précise.

## 4. Conception d'un Prototype

Dans cette section, nous allons développer le début de la conception d'un prototype en nous basant sur les éléments validés abordés précédemment.

### 4.1 Conceptions CAO

Trois cartes CAO ont été développées dans le but de réduire la quantité de câbles visibles sur le [montage](#) lors des expérimentations et de se passer des breadboards. L'objectif est de concevoir des cartes pouvant être intégrées dans le prototype final.

#### Circuit de chauffe :

La carte CAO la plus importante à développer était celle du circuit de chauffe. Sa conception nous permet de réduire considérablement le nombre de câbles et, grâce à des pistes de circuit imprimé correctement dimensionnées pour supporter de forts courants, de garantir une montée en puissance efficace. Cela nous permettra d'atteindre rapidement la température cible et de valider les temps de montée en température définis dans le cahier des charges. Par conséquent, la conception de cette carte constitue un élément majeur de notre projet.

Le schéma électrique réalisé sous PROTEUS est disponible en [annexe 4](#).

Le circuit imprimé correspondant est présenté ci-dessous :

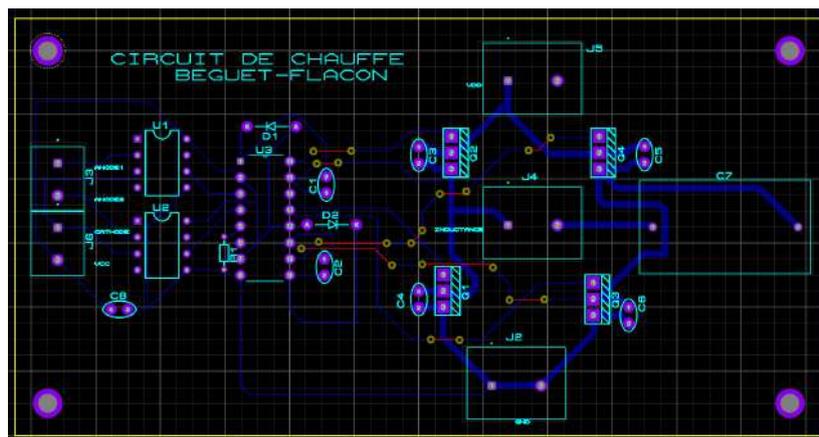


Figure 23: Circuit Imprimé du Circuit de Chauffe

Nous pouvons observer que les différents composants développés précédemment sont bien intégrés. Sur la partie gauche de la carte, se trouvent les éléments liés à la commande, notamment les entrées MLI, isolées galvaniquement à l'aide de deux optocoupleurs. Ensuite, le driver, avec ses 16 broches et les éléments nécessaires à son fonctionnement, est situé au centre de la carte. Enfin, sur la droite, se trouvent les éléments liés à la puissance : les quatre MOSFET montés en pont. Des condensateurs de faible valeur ont été ajoutés en parallèle de chaque MOSFET afin d'atténuer les perturbations susceptibles de remonter vers la commande. Nous retrouvons également le bornier du bus continu, par lequel entre la puissance, ainsi que le bornier placé au milieu du pont, qui sert de sortie vers l'inductance pour générer l'induction.

Il est également important de noter que les largeurs de pistes ne sont pas uniformes sur la carte. Sur la partie commande, des largeurs standard ont été utilisées, car les intensités en jeu sont faibles. En revanche, sur la partie puissance, les pistes ont été dimensionnées en tenant compte de l'épaisseur de la carte et de la largeur des pistes. Cela permet de supporter un courant de 10 ampères tout en

garantissant une élévation de température des pistes optimale, conformément à la norme IPC-2151, comme représenté ci-dessous.

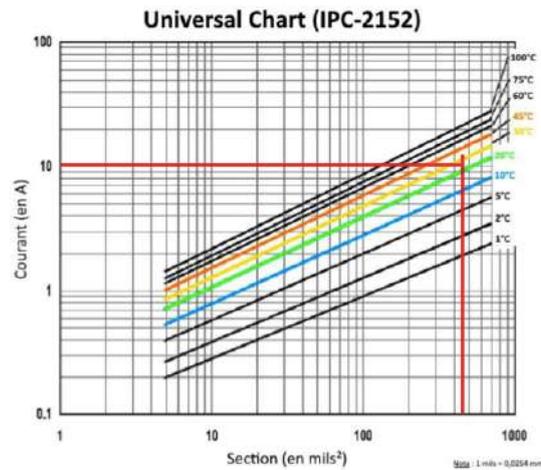


Figure 24: Norme IPC-2152 sur la Section des Pistes en fonction du Courant les Traversants [14]

Cette carte a été commandée et les composants ont été soudés. Le résultat est illustré dans la figure suivante :

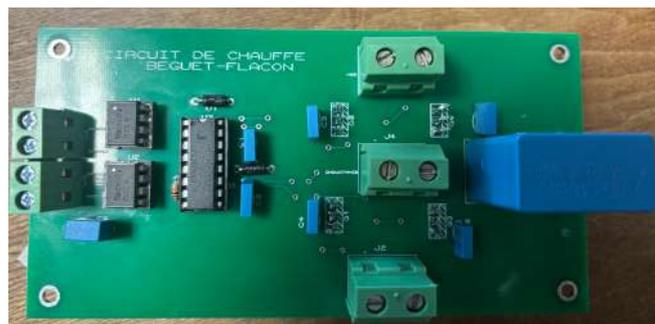


Figure 25: Carte du Circuit de Chauffage

Grâce à cette carte, nous pouvons désormais atteindre des tensions et des courants élevés, permettant de chauffer rapidement l'élément cible à des températures élevées. Cela a permis de valider une partie majeure des exigences du charges. Comme le montre cette photo prise à l'aide d'une caméra thermique :

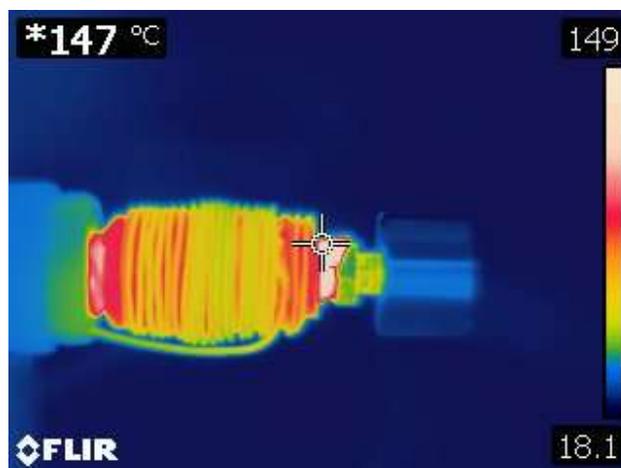


Figure 26: Résultat de la Capture de Température après la Conception CAO

### Mesure et réglage de la température :

Une carte dédiée à la captation et au réglage de la température a été nécessaire, afin de réduire, comme mentionné précédemment, le nombre de câbles utilisés, mais aussi de supprimer l'utilisation de breadboards. Elle permet également de positionner plus facilement le potentiomètre sur la face avant du futur prototype.

Le schéma électrique réalisé sous PROTEUS est disponible en [annexe 5](#).

Le circuit imprimé correspondant est présenté ci-dessous :

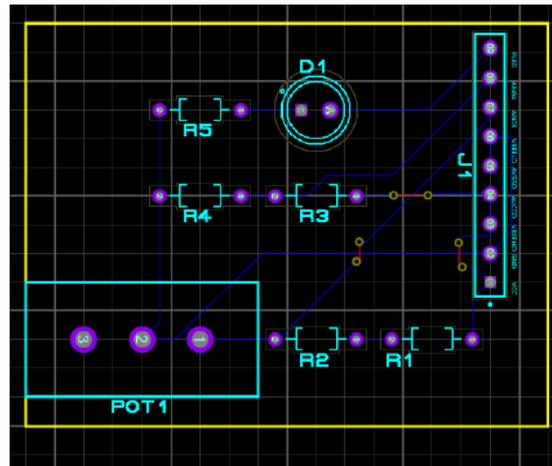


Figure 27: Circuit Imprimé du Circuit de Captation et Réglage de la Température

On peut observer que les principaux éléments développés dans les [parties précédentes](#) sont présents sur cette carte. On y retrouve les deux diviseurs de tension mentionnés précédemment : l'un pour le potentiomètre et l'autre pour la thermistance. De plus, un troisième circuit est intégré qui est LED verte, qui s'allume lorsque la température est atteinte, indiquant à l'utilisateur qu'il peut commencer à utiliser le fer. Enfin, on trouve le bornier d'entrées et de sorties, tous connectés au microcontrôleur.

### Écran LCD :

Enfin, une troisième et dernière carte a été conçue pour les mêmes raisons évoquées précédemment. Cette carte est dédiée à l'écran LCD, et permettra de positionner facilement l'écran sur la face avant du futur prototype, afin que l'utilisateur puisse visualiser de manière claire et efficace la température désirée.

Le schéma électrique réalisé sous PROTEUS est disponible en [annexe 6](#).

Le circuit imprimé correspondant est présenté ci-dessous :

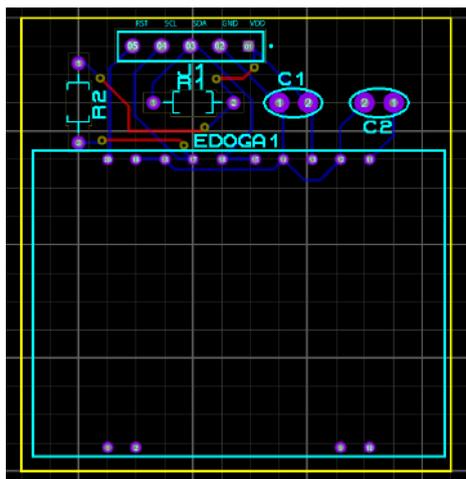


Figure 28: Circuit Imprimé de l'Écran LCD

On y retrouve l'écran, qui constitue la majeure partie de la carte, ainsi que le bornier d'entrées permettant au microcontrôleur de communiquer avec et d'alimenter l'écran. Divers composants nécessaires au bon fonctionnement de l'écran sont également présents sur la carte.

#### 4.2 Alimentation

L'alimentation du bus continu ainsi que des divers composants de la carte de puissance, tels que le driver et les optocoupleurs, sont alimentées par une alimentation continue de laboratoire externe. Cependant, lors des essais avec la carte CAO du circuit de chauffe, nous avons pu dimensionner la puissance nécessaire en entrée. Cela nous a permis de dimensionner une alimentation à découpage, qui convertit le réseau électrique 230 V alternatif en tension continue.

Le choix s'est porté sur une alimentation à découpage de la marque RS PRO, d'une puissance de 300 watts, capable de fournir en sortie 48 V en courant continu, avec un courant maximal de 6,7 ampères.

L'alimentation est présentée ci-dessous :



Figure 29: Alimentation à Découpage 300W [11]

Cependant, une adaptation de la tension sera nécessaire pour les éléments mentionnés précédemment, car le driver et les optocoupleurs fonctionnent par exemple à un maximum de 12 V en courant continu. Cela permettra de rendre le prototype autonome, il suffira de le brancher au réseau pour faire fonctionner tous les différents éléments.

## 5. Conclusion

### 5.1. Bilan

Tout au long du développement de ce rapport, nous avons démontré la validation progressive des fonctionnalités définies dans le cahier des charges. En effet, en ce qui concerne la fonctionnalité principale F1 (chauffe par induction de 60 à 200 degrés), nous avons validé son bon fonctionnement grâce aux expérimentations réalisées et à la modélisation CAO du circuit de chauffe. Pour la seconde fonctionnalité F2 (asservissement de la température), nous avons pu confirmer sa fiabilité grâce à la technique d'asservissement développée, à la mesure précise de la température, et aux différentes expérimentations menées. Quant à la fonctionnalité F3 (affichage de la température), nous avons démontré dans la partie dédiée à l'IHM que la température de consigne peut être affichée et qu'une LED verte indique lorsque cette consigne est atteinte. Enfin, la dernière fonctionnalité F4 (adaptabilité au réseau électrique standard) a été validée grâce au dimensionnement correct de l'alimentation à découpage, permettant le branchement de l'appareil sur une prise secteur classique.

Cependant, certaines contraintes nous ont été imposées, et le prototype développé devait les respecter. La première contrainte (C1) stipulait que le temps de montée en température devait être inférieur à 10 secondes. Cette exigence a été presque entièrement respectée grâce à la conception en CAO, qui a permis d'optimiser la montée en puissance en utilisant une largeur et une épaisseur de piste appropriées. Cela a favorisé une montée en température rapide et efficace, ainsi qu'une amélioration de la qualité des signaux. Toutefois, il est nécessaire de se rapprocher davantage de la résonance pour chauffer plus vite, donc il sera nécessaire de poursuivre des ajustements, notamment en ce qui concerne les propriétés intrinsèques des composants, afin de respecter pleinement la contrainte. La seconde contrainte (C2) concernait le poids du manche. Cette contrainte a été respectée en conservant la forme originale du manche et en ajoutant une inductance d'environ une centaine de spires autour de l'élément à chauffer (voir [annexe 7](#)). Malgré cet ajout, le poids du manche est resté en dessous de 250 grammes, répondant ainsi aux exigences. La troisième contrainte (C3) portait sur le volume et le poids du bloc d'alimentation, qui devait générer les tensions et courants nécessaires pour alimenter la bobine. Ce bloc devait être compact, portable, et respecter les dimensions spécifiées par le client. En ce qui concerne le poids (hors châssis métallique de l'alimentation), nous avons pu effectuer les calculs nécessaires, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Composants	Quantité	Poids unitaire (gr)	Poids total (gr)
Alimentation	1	890	890
Condensateur de Puissance	1	50	50
Mosfet	4	2	8
Radiateur MOSFET	4	10	40
Écran LCD	1	3	3
Circuit imprimé : Circuit de chauffe	1	2,5	2,5
Circuit imprimé : Circuit capture température	1	1	1
		<b>Total</b>	<b>994,5</b>

Figure 30 : Poids Total de L'Alimentation

On peut remarquer que seuls les éléments les plus lourds ont été pris en compte dans le calcul, car tous les autres composants plus légers, tels que les résistances, les drivers, les optocoupleurs, ou les petits condensateurs, pèsent très peu (< 1 gramme) et n'ont donc pas été inclus.

De plus, on remarque que la majeure partie du poids est lié à l'alimentation. Ainsi, l'alimentation, sans châssis, atteint un poids total légèrement inférieur à 1 kg. Cela valide en partie la contrainte du cahier des charges, car il reste une marge de plus de 3 kg pour concevoir le châssis tout en respectant les exigences du cahier des charges. En ce qui concerne le volume de l'alimentation, le client nous a proposé, lors d'une entrevue, un modèle ainsi qu'une forme d'alimentation qui sera développé dans la section suivante, nous pouvons donc conclure que la contrainte C3 a été respectée. Enfin, la dernière contrainte (C4) était liée au budget pour la partie induction. Par conséquent, le prix calculé ne prend pas en compte le coût du manche, des pannes ni du châssis. Le calcul du coût total de la partie induction est présenté dans le tableau suivant :

Composant	Quantité	Prix unitaire €	Prix €
Mosfet	4	1,67	6,68
Driver de MOSFET	1	3,48	3,48
Condensateur de puissance 33 $\mu$ F	1	2,77	2,77
Optocoupleur	2	3,81	7,62
Bornier 2 sorties	2	0,4	0,8
Bornier de puissance 2 sorties	3	0,8	2,4
Diodes	2	0,2	0,4
Carte developement TB-S3A6	1	32	32
Écran LCD	1	11,2	11,2
LED	2	0,06	0,12
Bouton poussoir	1	0,12	0,12
Potentiomètre 10k $\Omega$	1	2	2
Alimentation à découpage	1	40	40
Carte CAO circuit de chauffe (sans livraison)	1	1,44	1,44
Carte CAO capture température(sans livraison)	1	0,44	0,44
Bobine	1	6	6
		<b>Prix total :</b>	117,47 €

Figure 31:Coût Total du Prototype

On constate que le budget défini de 400 € dans la contrainte C4 a été largement respecté, car le cout total s'élève à un peu moins de 120 €.

## 5.2 Perspectives

Bien que toutes les fonctionnalités du cahier des charges aient été réalisées, ce prototype peut encore être amélioré pour devenir un véritable produit commercialisable, car il n'est pas entièrement terminé. Au niveau de ses fonctionnalités, une adaptation est nécessaire pour certains éléments qui fonctionnent en 12 V ou en 3.3 V à partir de l'alimentation de 48 V c.c. fournie. Il est également important d'isoler électriquement et thermiquement la thermistance utilisée pour mesurer la température. En effet, lorsque les fils non isolés se touchent ou entrent en contact avec le fer, cela perturbe le code et l'afficheur. De plus, les interférences générées par ce contact avec le métal peuvent affecter les signaux de commande. Par conséquent, l'isolation des deux fils de la thermistance doit être l'une des premières actions à entreprendre. Cela constitue les seules modifications à apporter pour rendre le système entièrement autonome en alimentation il suffira uniquement de le branché au réseau. Cependant, ce prototype peut être amélioré. En effet, comme mentionné précédemment, lors d'une entrevue avec notre client, celui-ci nous a proposé une forme et une taille de châssis métallique compatibles avec nos choix.

Le châssis se présente sous cette forme :



Figure 32: Exemple d'un Futur Châssis Possible [12]

Ce boîtier de la marque BOPLA (réf : ATPH-IP 2385), en aluminium, respecte bien les dimensions définies dans le cahier des charges. De plus, il est conforme en termes de poids. Dans un projet futur, il serait nécessaire d'adapter ce boîtier pour notre prototype, c'est-à-dire réaliser les ouvertures nécessaires à la ventilation des composants. Il faudra également prévoir d'équiper le boîtier d'une entrée 230 V et d'une sortie sous forme de câble, permettant de le connecter directement au manche du fer à fileter. Par ailleurs, l'interface homme-machine (IHM) pourra également être améliorée avec un système plus moderne. Il a été discuté avec le client de la possibilité d'une IHM comme celle présentée ci-dessous :



Figure 33:Exemple d'une IHM plus Moderne [13]

Cette IHM de la marque MATouch (réf : ESP32-S3), programmable et en communication I2C ou UART, serait un écran LCD tactile permettant de régler la température directement avec les doigts. La valeur de la consigne serait affichée au centre de l'écran. De plus, cette IHM serait contrôlable via Bluetooth et Wi-Fi, ce qui rendrait le produit plus moderne et attractif.

Si l'on rassemble tous les éléments développés depuis le début, on peut imaginer le produit final qui pourra être commercialisé :

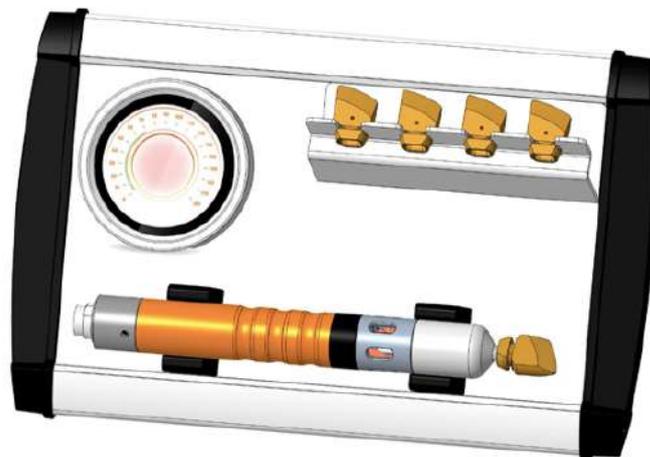


Figure 34:Perspectives d'un Futur Produit Final

Sur cette image représentant une perspective du produit final, on peut y retrouver les différents éléments développés dans cette partie, tels que l'IHM plus moderne qui y est installée. On y distingue également le fer à fileter, installé sur un petit support prévu à cet effet. On peut également imaginer, sur les côtés, des ouvertures dans le boîtier pour refroidir les composants, ainsi que l'alimentation secteur arrivant à l'arrière du boîtier.

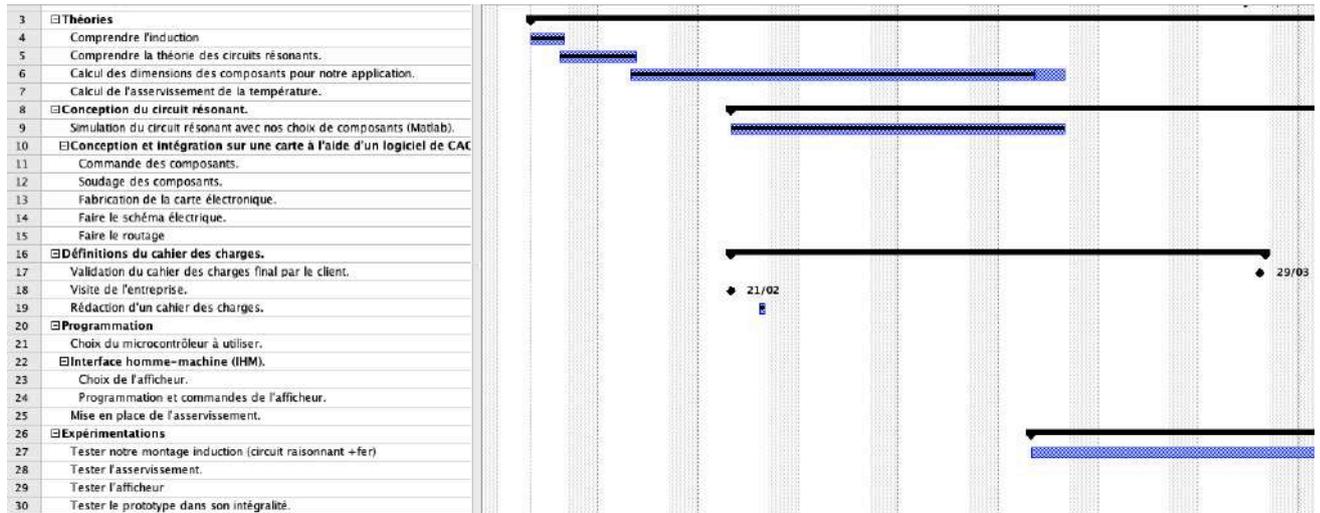
## Bibliographie :

- [1]. Induction électromagnétique, Wikipédia, URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Induction\\_électromagnétique#:~:text=L'induction%20électromagnétique%20est%20un,courant%20électrique%20dans%20le%20conducteur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Induction_électromagnétique#:~:text=L'induction%20électromagnétique%20est%20un,courant%20électrique%20dans%20le%20conducteur)
- [2]. Comprehensive Guide to Induction Furnace, What, How, and Where URL : <https://www.induction-furnace.com/company-news/comprehensive-guide-to-induction-furnace/>
- [3]. Induction électromagnétique, Polyplus, URL : <https://www.polyplus.fr/chauffage-par-induction/induction-magnetique/>
- [4]. Étude par simulation d'un onduleur à haute fréquence, application au chauffage à induction, Kamel MOUSLI Youcef MAMERI, URL : <https://dspace.ummo.dz/server/api/core/bitstreams/29abf446-76cf-49c6-9c6f-93ae48ed9096/content>
- [5]. Résonance dans les circuits à courant alternatif, Nagwa , URL : <https://www.nagwa.com/fr/explainers/108147821682/>
- [6]. MOSFET IRLIZ14G, Vishay, URL: <https://www.vishay.com/docs/91315/sihliz14.pdf>
- [7]. Driver HIP4082, Renesas , URL: [https://www.renesas.com/en/document/dst/hip4082-datasheet?srsId=AfmBOorj\\_DSJH5FkKt1f2cjH117ipr2Rn2dYjPBAj9Uvd2iOxxvFy5-](https://www.renesas.com/en/document/dst/hip4082-datasheet?srsId=AfmBOorj_DSJH5FkKt1f2cjH117ipr2Rn2dYjPBAj9Uvd2iOxxvFy5-)
- [8]. Carte development TB-S3A6 , Renesas URL: <https://www.renesas.com/en/document/qsg/target-board-s3a6-tb-s3a6-quick-start-guide?r=1261726>
- [9]. Régulation Industrielle, ISET, URL : <https://isetn.rnu.tn/archives/fr/images/documents/cours/Régulation%20Industrielle%20L2%20S2.pdf>
- [10]. Ercan LCD, Display Vision URL: <https://www.lcd-module.com/fileadmin/eng/pdf/doma/dogs104e.pdf>
- [11]. Alimentation à découpage, RS PRO, URL : <https://docs.rs-online.com/1bfa/A700000008879823.pdf>
- [12]. Boitier ATPH-IP 2385-0300, Bopla, URL : <https://www.bopla.de/fr/technique-de-boitiers/alu-topline/boitiers-ip65/profiles-de-boitier-divises-horizontalement-6/atph-ip-2385-0300>
- [13]. Écran TFT Rond SPI avec Fonction Tactile, 1,28 pouce, Compatible ESP32-S3 , MATouch , URL : <https://eu.robotshop.com/fr/products/matouch-ecran-tft-rond-spi-fonction-tactile-128-pouce-compatible-esp32-s3>
- [14]. Universal chart IPC-2152, Passion électronique : <https://passionelectronique.fr/calcul-largeur-piste-pcb-cuivre/>

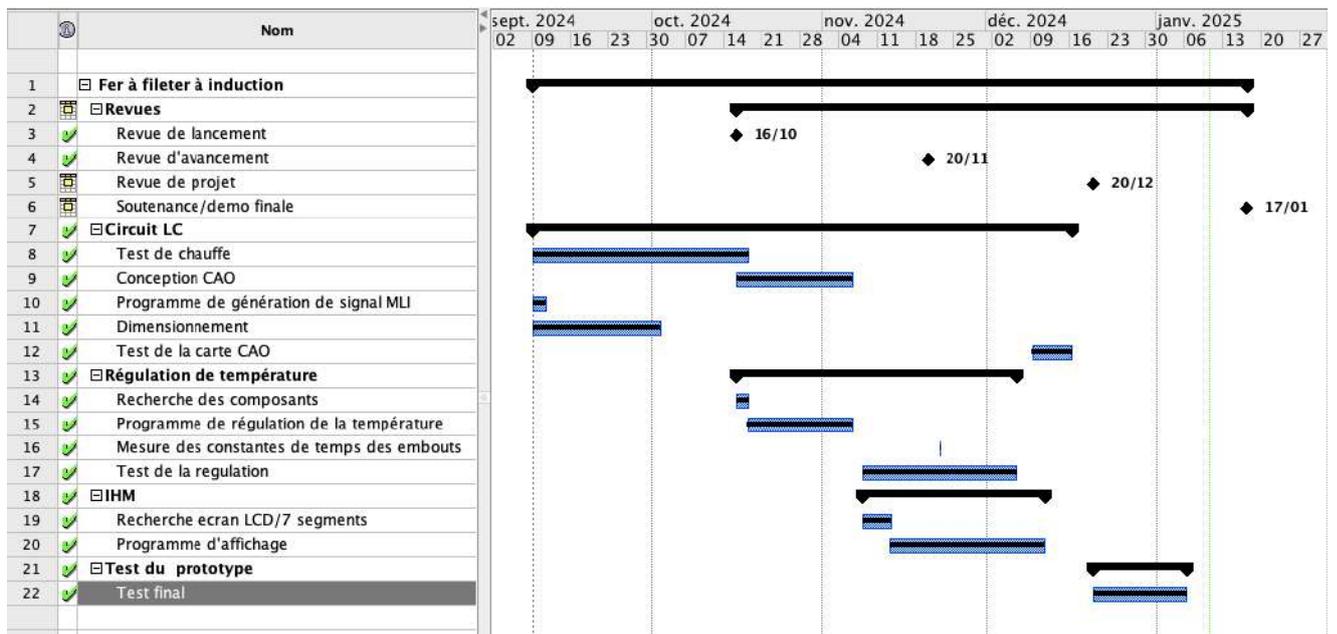
## Table des annexes

Annexe 1 : GANTT4A.....	II
Annexe 2 : GANTT 5A.....	II
Annexe 3 : Schéma de simulation d'un circuit résonant sur Matlab .....	III
Annexe 4 : Schéma Proteus circuit de chauffe .....	III
Annexe 5 : Schéma Proteus capture et réglage de la température.....	IV
Annexe 6 : Schéma Proteus écran LCD .....	IV
Annexe 7 : Manche équipé de la bobine .....	V

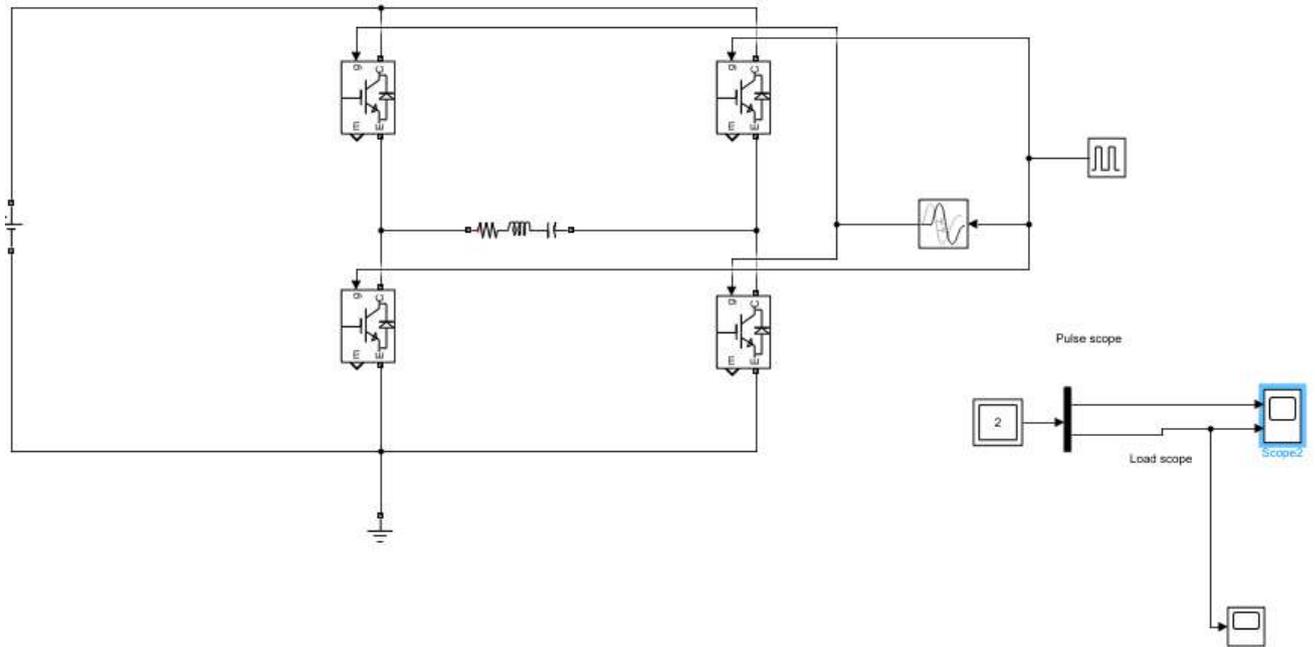
Annexe 1 : GANTT4A



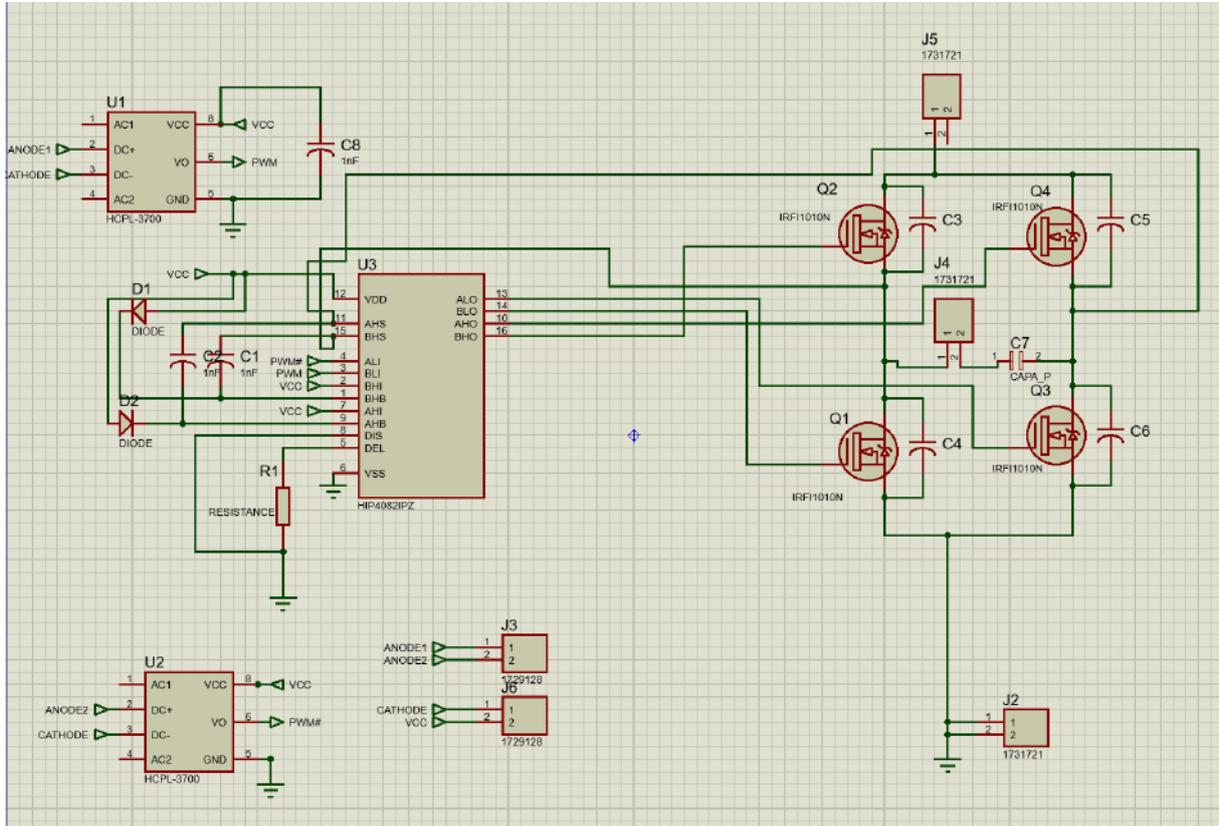
Annexe 2 : GANTT 5A



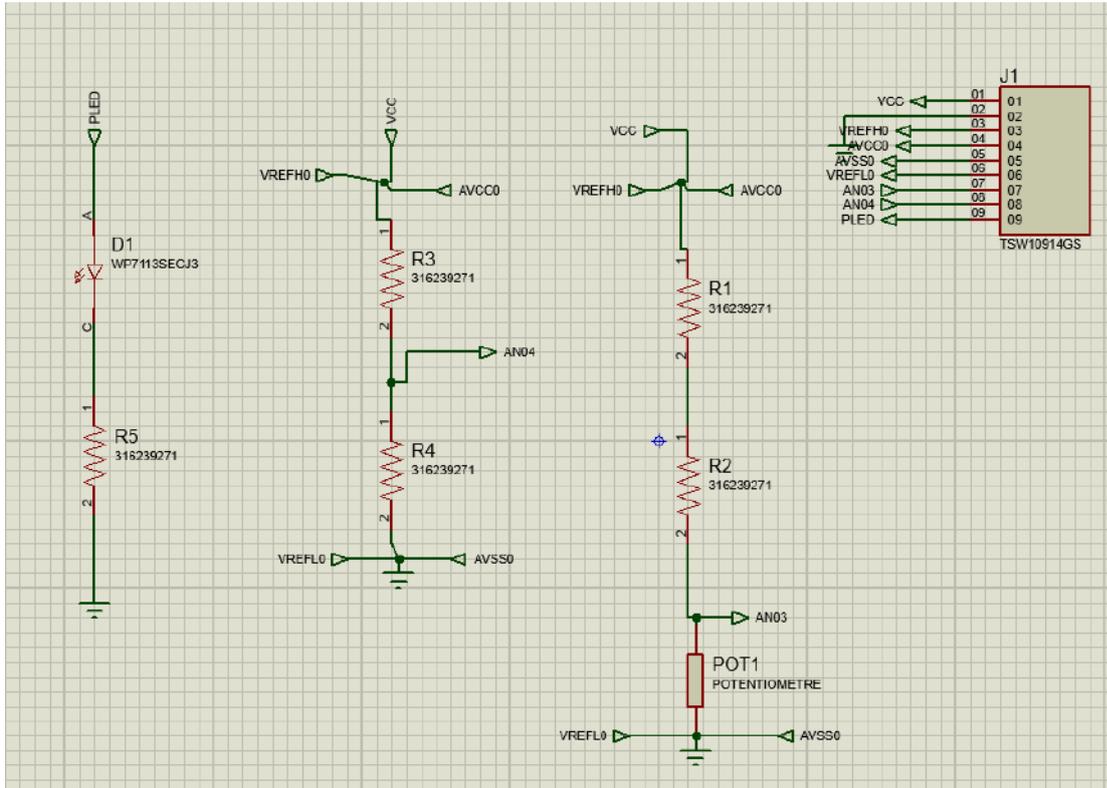
Annexe 3 : Schéma de simulation d'un circuit résonant sur Matlab



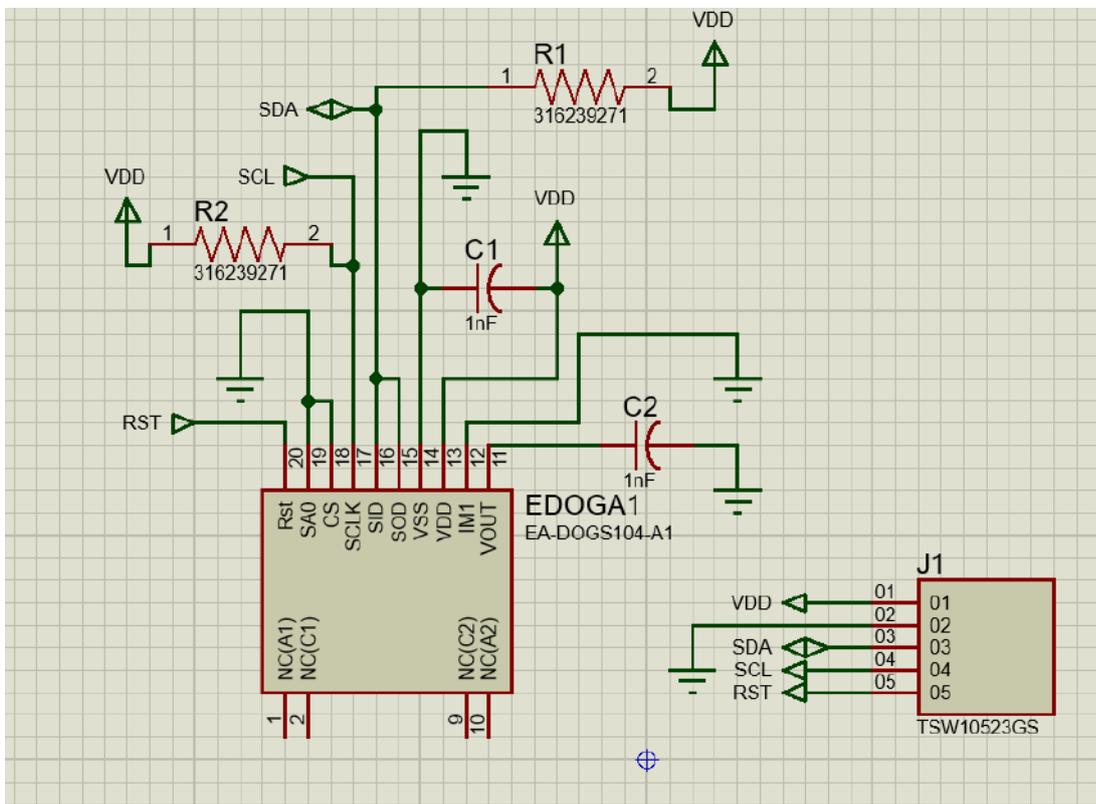
Annexe 4 : Schéma Proteus circuit de chauffe



Annexe 5 : Schéma Proteus capture et réglage de la température



Annexe 6 : Schéma Proteus écran LCD



Annexe 7 : Manche équipé de la bobine

