



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Kasdi Merbah – Ouargla –

Faculté des Nouvelles Technologies de l'information et de la Communication

Département d'électronique et de Télécommunications

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MASTER ACADEMIQUE**

Spécialité : Automatique et Systèmes

Thème:

Etude et réalisation d'un circuit de contrôle d'injecteur diesel

Présenté par :

Kamel GASMI

Serhane OUGUIS

Devant le jury:

M^{eme}. SOURI Samira

MAA

Présidente

UKM Ouargla

M^{eme}. CHAIB Ibtissam

MCA

Examineur

UKM Ouargla

Mr. TIDJANI Zakaria

MAA

Encadreur

UKM Ouargla

Année universitaire : 2023/2024

Dedicace:

À ceux qui ont eu le plus grand mérite dans l'accomplissement de cette réalisation, à ceux qui ont partagé avec moi la lourdeur du long chemin, à ceux qui ont été un soutien à chaque pas.

À mes chers parents, qui m'ont appris que l'espoir et le travail sont les clés du succès, qui m'ont offert tout ce dont j'avais besoin sans jamais se lasser.

À mes professeurs distingués, qui m'ont donné de leur savoir et de leurs idées, et qui ont été une source d'inspiration tout au long de ces années d'études.

À mes chers collègues, compagnons de voyage, dont la compagnie a été la plus agréable au cours de ces années.

À tous ceux qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre, par une parole ou par un acte, je dédie ce travail modeste, en espérant qu'il soit le début de succès plus grands et plus glorieux.

Remerciements

Nous remercions d'abord Dieu qui nous a donné la force et le courage d'accomplir cet humble travail. Nous tenons à remercier **Mme. SOURI Samira** de l'Université de Kasdi Merbah, Ouargla, pour avoir accepté de présider ce comité d'encadrement. Nous remercions également **Mme. CHAIB Ibtissam** de l'Université Kasdi Merbah de Ouargla, d'avoir accepté la discussion de ce travail par le jury estimé

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur **Mr. TIDJANI Zakaria** maître assistant à l'Université Kasdi Merbah pour sa patience et son soutien continu pour nous fournir un bon environnement de travail et un contrôle qualité. Nous remercions vivement **Mr. Talib Islam Khudairi** d'être à nos côtés et de nous aider le long de ce travail.

Enfin, nous tenons également à remercier nos chers amis et collègues et tous ceux qui ont aidé de près ou de loin afin pour mener à bien ce travail, nous remercions tous nos professeurs du département des communications et de l'électronique à l'université Kasdi Merbah - Ouargla, sans oublier de transférer tous les enseignants qui ont contribué à notre formation de l'école primaire aux études universitaires.

Résumé :

Le but de ce travail était de concevoir une plateforme de test pour un injecteur diesel. L'étude vise à développer la création d'une carte électronique pour contrôler l'injecteur solénoïde et déterminer l'état actuel des injecteurs et la qualité de leur fonctionnement.

Le châssis se compose de PIC18F4550, PIC16F877A, résistance, diode, Optocoupleur, MOSFET.

Ce circuit électronique a été testé à l'aide du logiciel Proteus, et deux contrôleurs ont également été programmés à l'aide de mikroC PRO pour PIC .

Mots clés : PIC18F4550, PIC16F788, Optocoupleur , MOSFET , Proteus, mikroC PRO pour PIC .

Abstract :

The aim of this work was to design a test platform for a diesel injector. The study aims to develop the creation of an electronic card to control the solenoid injector and determine the current state of the injectors and the quality of their operation.

The chassis consists of PIC18F4550, PIC16F877A, resistor, diode, Optocoupler, MOSFET .

This electronic circuit was tested using Proteus software, and two controllers were also programmed using mikroC PRO for PIC.

Key words: PIC18F4550, PIC16F788, optical cutter, MOSFET , Proteus, mikroC PRO for PIC.

ملخص:

كان الهدف من هذا العمل هو تصميم منصة اختبار لحاقن الديزل. تهدف الدراسة إلى تطوير إنشاء بطاقة إلكترونية للتحكم في حاقن الملف اللولبي وتحديد الوضع الحالي للمحاقن ونوعية تشغيلها.

يتكون الهيكل من PIC18F4550, PIC16F788, المقاوم , الصمام الثنائي , قاطعة الضوئية, MOSFET,

تم اختبار هذه الدائرة الإلكترونية باستخدام برنامج Proteus كما تمت برمجة وحدتي تحكم

. mikroC PRO for PIC

. الكلمات المفتاحية : PIC18F4550 , PIC16F788 , قاطعة الضوئية , MOSFET , Proteus , mikroC PRO for PIC .

Sommaire

DEDICACE:	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME :	III
SOMMAIRE	IV
LISTE DES FIGURES :	VII
LISTE DES TABLEAUX :	VIII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: SYSTEMES D'INJECTION DIESEL	4
1. INTRODUCTION.....	5
2. SYSTEME D'INJECTION DIESEL.....	5
3. STRUCTURE DE SYSTEME D'INJECTION DE VEHICULE	7
3.1 <i>Réservoir de carburant</i>	8
3.2 <i>Filtre à carburant</i>	9
3.3 <i>Pompe à carburant</i>	9
3.4 <i>Système de gestion électronique (ECU)</i>	9
3.5 <i>Rampe commune (Common rail)</i>	9
3.6 <i>Injecteurs</i>	9
3.7 <i>Capteurs</i>	9
4. INJECTEURS.....	10
4.1 <i>Composantes de l'injecteur</i>	10
4.1.1 <i>La partie supérieure</i>	10
4.1.2 <i>La partie inférieure</i>	10
4.2 <i>Les types d'injecteurs diesel</i>	11
4.2.1 <i>Les injecteurs solénoïde</i>	11
4.2.2 <i>Les injecteurs piézoélectriques</i>	13
4.2.3 <i>Injection directe</i>	14
4.2.4 <i>Injection indirecte</i>	15
4.3 <i>Fonctionnement</i>	16
4.4 <i>Alimentation en carburant</i>	16
4.5 <i>Pressurisation du carburant</i>	16
4.6 <i>Combustion</i>	16
5. L'UNITE DE COMMANDE ELECTRONIQUE (CALCULATEUR DES COMMANDES DU MOTEUR) DE VEHICULE.....	16
5.1 <i>Fonctionnement</i>	17

5.2	<i>Surveillance des capteurs</i>	17
5.3	<i>Traitement des données</i>	17
5.4	<i>Contrôle de l'injection de carburant</i>	18
6.	INCONVENIENTS.....	18
6.1	<i>Inconvénients des injecteurs solénoïdes</i> :	18
6.2	<i>Inconvénients des injecteurs piézoélectriques</i> :	18
7.	CONCLUSION.....	18
CHAPITRE II: SYSTEMES DE DIAGNOSTICS D'INJECTION DIESEL		20
1.	INTRODUCTION.....	21
2.	STANDARDS DE TESTS DES INJECTEURS DIESELS.....	21
2.1	<i>ISO Normes relatives aux injecteurs diesel</i> :	21
2.1.1	Normes SAE pour les injecteurs diesel:.....	22
2.1.2	Normes spécifiques des constructeurs automobiles:	22
2.1.3	Importance des normes de test :	22
2.2	<i>Caractéristiques des injecteurs diesel</i>	23
2.3	<i>Points de test standard</i>	24
2.4	<i>Codification et Base de Données pour Injecteurs Diesels</i>	26
2.4.1	Codification :	26
2.4.2	Base de Données :	27
3.	COMMANDE DES INJECTEURS DIESELS	28
3.1	<i>Injecteur solénoïde (électromagnétique)</i>	29
3.1.1	Constitution de l'injecteur solénoïde (électromagnétique)	29
3.1.2	Composition de Bobine de l'électroaimant.....	30
3.2	<i>L'injecteur Piézo-électrique</i>	33
3.2.1	Combinaison de l'injecteur Piézo-électrique.....	33
4.	CONTROLE GENERAL DES INJECTEURS DIESELS.....	35
4.1	<i>Contrôle Bobine de injecteur solénoïde</i>	35
4.2	<i>Contrôle de l'injecteur Piézo-électrique</i>	36
5.	CONCEPTION DU CIRCUIT ELECTRONIQUE DE COMMANDE	38
5.1	<i>Le circuit à microcontrôleur</i>	38
5.1.1	Définition générale d'un microcontrôleur :	38
5.1.2	Le circuit Électronique.....	39
5.2	<i>Le circuit de contrôle l'injecteur solénoïde (électromagnétique)</i>	40
5.3	<i>Le circuit de contrôle l'injecteur Piézo-électrique</i>	41
5.4	<i>La communication</i>	42
5.4.1	Base de Données.....	45
6.	CONCLUSION.....	48
CHAPITRE III: REALISATION ET RESULTATS		49

1. INTRODUCTION.....	50
2. CONCEPTION DU CIRCUIT ET DE LA CARTE ELECTRONIQUE	50
2.1 Conception du circuit électronique.....	50
2.2 Réalisation de la carte électronique.....	53
3. PROGRAMMATION INTERFACE DE PROGRAMME	55
3.1 Interface de programme	55
3.2 Ecrire programme.....	57
3.3 Compilation.....	57
3.4 Chargement Programme.....	58
4. TEST ET RESULTATS.....	59
4.1 Les composants de l'expérimentation	59
4.2 Résultat de test :	60
4.2.1 Test 01 :	60
4.2.2 Test 02 :	60
4.2.3 Test 03 :	61
4.2.4 Test 04 :	62
5. CONCLUSION.....	63
CONCLUSION GENERALE	64
REFERENCES	66

Liste des figures :

Figure I.1: Composants système d'injection Diesel	6
Figure I.2: alimentation carburante	7
Figure I.3 : L'injecteur diesel.....	10
Figure I.4: Injecteur électrique à électrovanne	11
Figure I.5: injecteurs piézoélectriques	13
Figure I.6: l'unité Contrôle électronique.....	17
Figure II.1: Plan de la carte injecteur.....	23
Figure II. 2: Références des injecteurs BOSCH	27
Figure II.3: Références des injecteurs Delphi.....	27
Figure II.4: Références des injecteurs Dense.....	28
Figure II.5: Références des injecteurs Siemens.....	28
Figure II.6: Composition L'injecteur électromagnétique.....	29
Figure II.7 Schéma d'une bobine de.....	30
Figure II.8: Pour contrôler le débit, une électrovanne utilise un équilibre des forces entre le champ magnétique de la bobine	32
Figure II.9: combinaison l'injecteur Piézo-électrique	33
Figure II.10: Allure de courant pour une le type Solénoïde.....	35
Figure II. 11: Allure du courant et de la tension pour le type Pièze.....	37
Figure II.12: Le circuit à microcontrôleur.....	40
Figure II.13: Le schéma circuit de commande à interrupteur unique à puissance unique est illustré injecteur électromagnétique	41
Figure II.14: Schéma schématique du circuit pilote de l'injecteur piézo : (a) charge, (b) maintenir et (c) l'état de déchargement	42
Figure III.1: Circuit alimentation.....	50
Figure III.2: Circuit de communication	51
Figure III.3: Circuit de traitement des données	52
Figure III.4: Circuit de commande des injecteurs	53
Figure III.5: Création de nouveau projet dans Proteus	53
Figure III.6: Dénomination du nouveau projet.....	54
Figure III.7: Composant circuit électrique	54
Figure III.8: Circuit Complet de composants.....	55
Figure III.11: Comment ouvrir un nouveau fichier dans mikroC PRO for PIC	55
Figure III.12: MY_PIC18_INJECTOR	56
Figure III.13: le Projet MY_PIC16_INJECTOR.....	56
Figure III.14: Explique la partie de la programmation	57
Figure III.15: Mise en œuvre de la programmation	57
Figure III.16: Charger la programmation dans PIC18	58
Figure III.17: Chargement du programme dans PIC16	58

Figure III.18: Composantes du projet terminé.....	59
Figure III.19: La tension est appliquée à l'injecteur solénoïde pendant 800 μ s	60
Figure III.20: La tension est appliquée à l'injecteur solénoïde pendant 500 μ s.....	61
Figure III.21: La tension est appliquée à l'injecteur solénoïde pendant 550 μ s.....	62
Figure III.22: La tension est appliquée à l'injecteur solénoïde pendant 160 μ s.....	63

Liste des tableaux :

Tableau I.1: Nomenclature des pièces.....	8
Tableau I.2: L'injecteur diesel.....	10
Tableau II.1: Fonctions et arguments de la communication.....	43
Tableau II.2 : Extrait de la base de données de Bosch.....	46
Tableau II.3: Extrait de la base de données de Delphi.....	46
Tableau II.4: Extrait de la base de données de Denso.....	47
Tableau II.5: Pièzo.....	48

Introduction Générale

Un moteur Diesel fonctionne différemment d'un moteur à essence. Même si leurs principaux organes sont semblables et s'ils respectent le même cycle à quatre temps, un moteur Diesel et un moteur à explosion présentent des différences sensibles, en particulier dans la façon dont le mélange carburé y est enflammé et dans la manière dont la puissance délivrée y est régulée. Dans un moteur à essence, le mélange carburé est enflammé par une étincelle électrique. Dans un moteur Diesel, l'allumage est obtenu par une auto-inflammation du carburant à la suite de l'échauffement de l'air sous l'effet de la compression.

Dans la pratique, nous trouvons des bancs de test qui simulent les conditions réelles de fonctionnement des injecteurs, permettant aux techniciens d'évaluer une multitude de paramètres critiques pour leur performance. Parmi ces paramètres, on cite :

- **Le motif de pulvérisation et l'atomisation du carburant** : Ces éléments garantissent une combustion optimale du carburant, réduisant ainsi les émissions polluantes et améliorant l'efficacité du moteur.
- **Le débit et la distribution du carburant** : Un débit et une distribution précis du carburant sont essentiels pour un fonctionnement optimal du moteur et pour éviter une surconsommation de carburant.
- **Le temps de réponse** : Ce paramètre mesure la rapidité avec laquelle l'injecteur réagit aux commandes électroniques, influençant directement la performance du moteur.
- **Les caractéristiques d'ouverture/fermeture de l'injecteur** : Ces caractéristiques garantissent une étanchéité parfaite et un contrôle précis de l'injection du carburant.

Notre objectif futur est de concevoir un banc d'essai des injecteurs diesel ou essence qui permettra de déterminer l'état actuel des injecteurs et la qualité de leur fonctionnement.

La réalisation d'un banc d'essai des injecteurs nécessite un travail important qui regroupe des parties mécaniques, électriques et aussi électronique.

L'objectif de ce travail est d'étudier et de réaliser un circuit typique de contrôle des injecteurs solénoïdes qui constituera le premier pas vers la concrétisation d'un banc d'essai complet selon les standards.

Ainsi, nous avons organisé notre mémoire comme suit :

Dans le premier chapitre nous allons présenter les différentes notions et informations liée au système d'injection. Le deuxième chapitre présentera les standards et les paramètres d'évaluation des injecteurs qui sont recommandés par les constructeurs ainsi que les circuits électroniques de contrôle. Dans ce chapitre, nous allons proposer un schéma électronique de contrôle des injecteurs solénoïdes. Dans le dernier chapitre, nous développerons la réalisation de la carte électronique de contrôle ainsi que le montage et les résultats de test. [1]

Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I: Systemes D'injection Diesel

1. Introduction

De nombreux facteurs influencent les émissions d'échappement des moteurs diesel et l'économie de carburant, et ces facteurs sont assez compliqués. Le moyen le plus important d'améliorer les émissions et les performances économiques des moteurs diesel consiste à améliorer leurs performances de combustion.

Par conséquent, la transformation du système d'injection de carburant est devenue un sujet de préoccupation primordial car c'est elle qui a la plus grande influence sur les performances de combustion.

Les paramètres qui ont un impact sur les performances du système d'injection de carburant diesel comprennent principalement la pression d'injection, la quantité d'injection, l'angle d'avance de l'injection de carburant, etc.

Les méthodes traditionnelles ne sont pas en mesure de faire en sorte que ces paramètres dans le moteur diesel obtiennent des résultats optimaux dans le large éventail de travaux effectués sur le moteur diesel, mais le développement de la technologie électronique moderne a fourni un large espace pour améliorer les performances du moteur diesel.

L'impact le plus important du système d'injection de carburant du moteur diesel sur la combustion concerne trois facteurs : le calage de l'injection, la durée de l'injection et la loi d'injection de carburant.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la structure et les principales composantes d'un système d'injection diesel. Par la suite, nous allons examiner l'injecteur son rôle et ces principaux types. Pour le contrôle de ces injecteurs, nous allons examiner l'unité de commande électronique dédiée aux systèmes d'injection diesel.

2. Système d'injection Diesel

La figure (I.1) montre les composants du système d'injection directe de carburant dans un moteur diesel. Ce système est chargé de pomper le carburant dans les cylindres à très haute pression, puis de le pulvériser sous forme de brouillard fin de minuscules gouttelettes. Cela permet une combustion très efficace du carburant, ce qui se traduit par une amélioration des performances du moteur, de l'efficacité énergétique et une réduction des émissions.

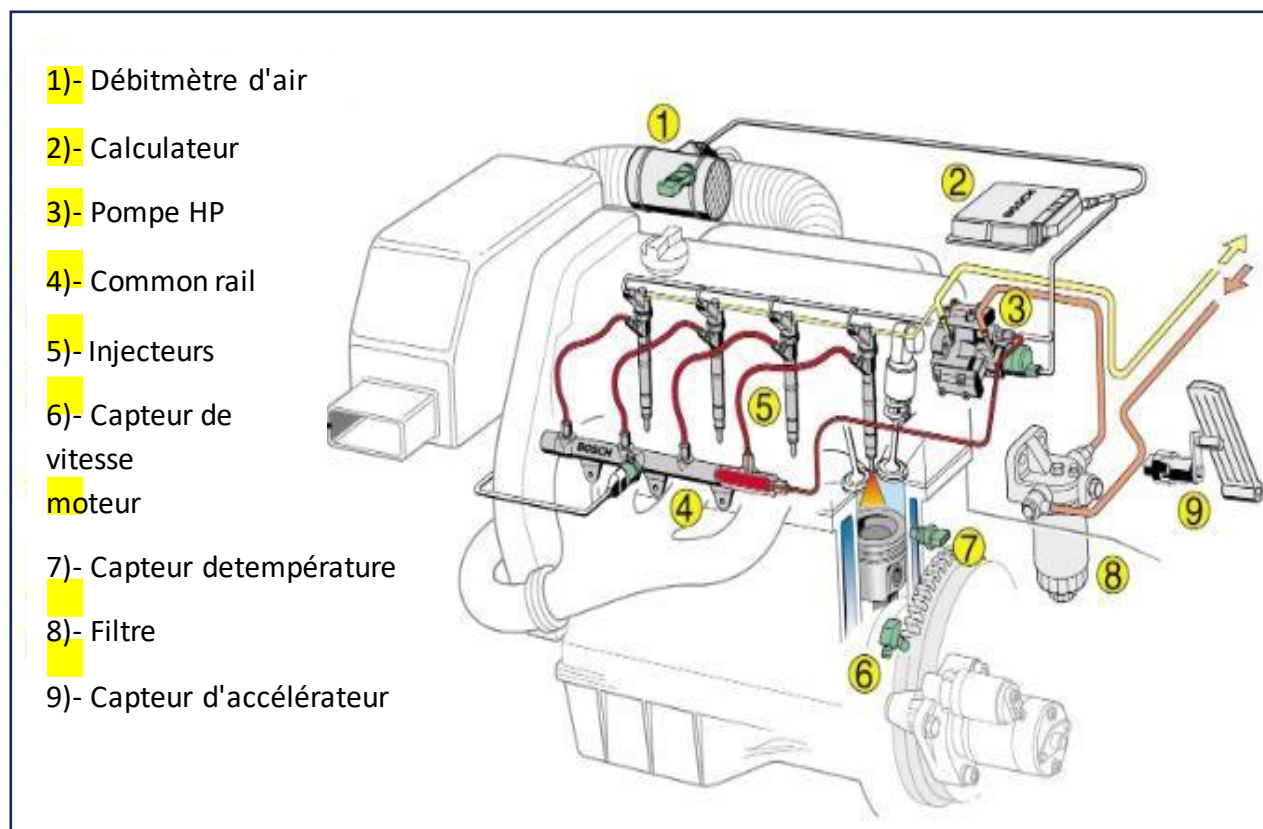


Figure I.1: Composants système d'injection Diesel

[2]

1. **Débitmètre d'air** : Situé en haut à gauche du moteur, il mesure la quantité d'air aspirée par le moteur.
2. **Calculateur** : Juste à droite du débitmètre d'air, le calculateur gère le fonctionnement du système d'injection.
3. **Pompe HP (Haute Pression)** : Au centre de l'image, elle est responsable de la pressurisation du carburant.
4. **Common rail** : Également au centre, le common rail est un conduit qui distribue le carburant aux injecteurs.
5. **Injecteurs** : Ils sont reliés au common rail et injectent le carburant directement dans les cylindres du moteur.

6. **Capteur de vitesse moteur** : En bas au centre, il mesure la vitesse de rotation du moteur.
7. **Capteur de température** : Un peu plus à droite, il surveille la température du moteur.
8. **Filtre** : Positionné en bas à droite du schéma, il filtre les impuretés du carburant.
9. **Capteur d'accélérateur** : Indiqué par la flèche jaune pointant vers la pédale d'accélérateur, il détecte la position de l'accélérateur.

3. Structure de système d'injection de véhicule

La structure d'un système d'injection diesel peut varier selon les conceptions spécifiques des fabricants et les technologies utilisées. Cependant, voici une structure générale qui comprend les principaux composants d'un système d'injection diesel moderne. La figure I.2 résume ce principe.

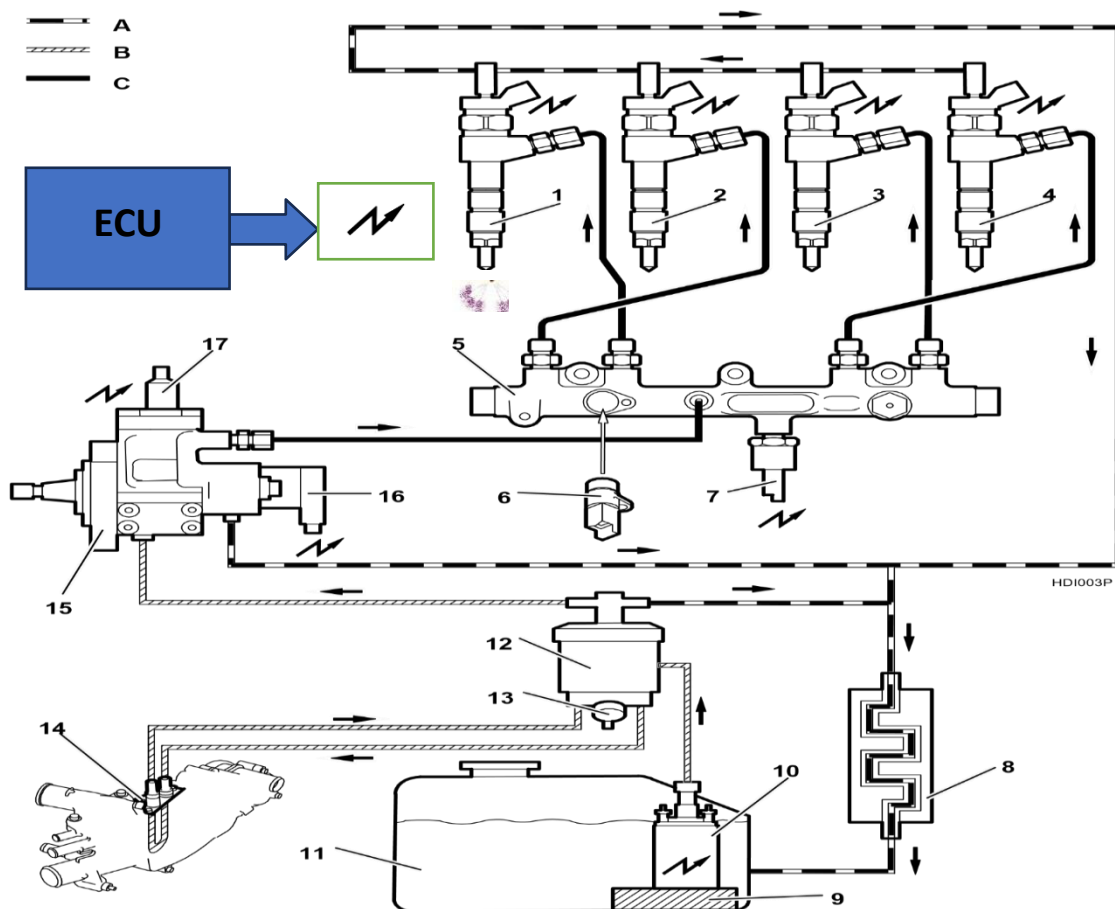


Figure I.2: alimentation carburante [3]

❖ Légende

A - Circuit de retour (vers le réservoir à carburant)

B - Circuit basse pression

C - Circuit haute pression carburant

Tableau I.1: Nomenclature des pièces

REPERE	DESIGNATION
1 - 4	injecteurs (commande électrique)
5	Rampe d'injection haute pression carburant
6	Sonde de température carburant.
7	Capteur haute pression carburant
8	Refroidisseur de carburant
9	Pré-filtre
10	Pompe de gavage (basse pression)
11	Réservoir à carburant
12	Filtre à carburant + décanteur d'eau + régulateur de pression du circuit basse pression
13	Vis de purge d'eau
14	Réchauffeur de carburant
15	Pompe haute pression carburant
16	Régulateur haute pression carburant (sur pompe haute pression)
17	Désactivateur du 3ème piston de pompe haute pression

3.1 Réservoir de carburant

C'est là où le carburant diesel est stocké jusqu'à ce qu'il soit utilisé par le moteur.

3.2 Filtre à carburant

Situé en amont de la pompe à carburant, le filtre à carburant élimine les impuretés et les particules qui pourraient endommager les composants du système d'injection.

3.3 Pompe à carburant

La pompe à carburant est chargée de transférer le carburant diesel du réservoir vers le système d'injection à la pression appropriée. Dans les moteurs diesel modernes, il peut s'agir d'une pompe haute pression contrôlée électroniquement.

3.4 Système de gestion électronique (ECU)

L'unité de contrôle électronique (ECU) surveille et contrôle divers aspects du moteur, compris le timing et la quantité d'injection de carburant.

3.5 Rampe commune (Common rail)

Dans les systèmes d'injection diesel modernes, le carburant est souvent stocké à haute pression dans un collecteur commun appelé rampe commune. Cela permet un contrôle précis de l'injection de carburant pour chaque cylindre du moteur.

3.6 Injecteurs

Les injecteurs sont responsables de vaporiser le carburant diesel dans les chambres de combustion du moteur aux moments appropriés et à la pression correcte. Dans les systèmes modernes, ils sont généralement pilotés électroniquement pour permettre un contrôle précis de l'injection.

3.7 Capteurs

Divers capteurs sont utilisés pour mesurer des paramètres tels que la pression du carburant, la température, la vitesse du moteur, etc. Ces informations sont utilisées par l'ECU pour ajuster le fonctionnement du système d'injection en temps réel.

- ✚ En connaissant la structure du système d'injecteur Diesel, nous concentrerons notre étude sur l'injecteur et son circuit électronique

4. Injecteurs

L'injecteur permet la pulvérisation du carburant dans la chambre de pression en dosant avec précision le débit et le point d'avance La figure I.3. résume ce principe. [4]

Tableau I.2: L'injecteur diesel

1	Electrovanne
2	Arrivée du carburant
3	Retour du carburant
4	Connexion électrique
5	Chambre de commande
6	Chambre de pression
7	Pointeau de l'injecteur
8	Ressort de l'injecteur
9	Piston de commande
10	Clapet à bille
11	Buse de retour

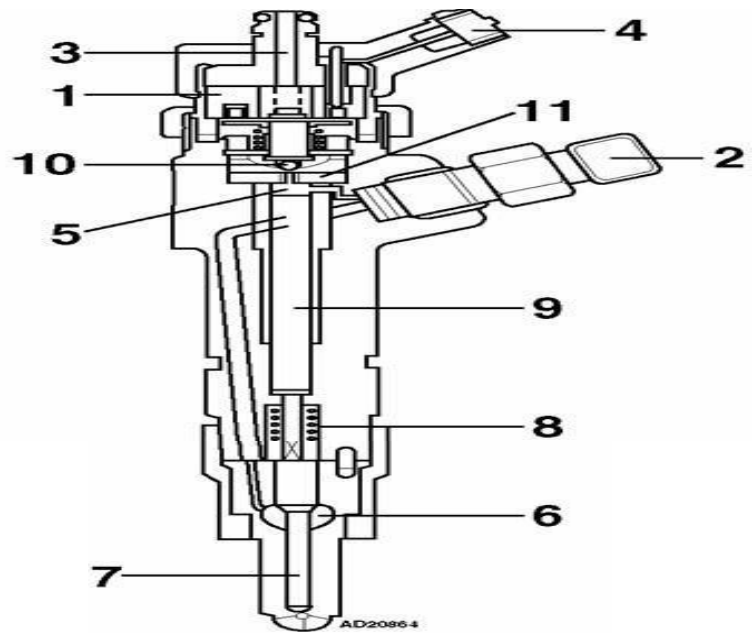


Figure I.3 : L'injecteur diesel

4.1 Composantes de l'injecteur

L'injecteur peut être considéré comme la composition de deux parties :

4.1.1 La partie supérieure

C'est un dispositif à commande électrique qui permet la commande de L'aiguille qui constitue le mécanisme d'ajustement de la quantité de gasoil à injectée.

4.1.2 La partie inférieure

C'est un injecteur à trous multiples, semblable aux injecteurs classiques montés sur les

moteurs à injection directe.

4.2 Les types d'injecteurs diesel

Les systèmes d'injection de carburant dans les moteurs diesel se déclinent en deux types principaux : les systèmes d'injection à solénoïde et les systèmes d'injection piézoélectrique. Chaque type présente ses propres avantages.

4.2.1 Les injecteurs solénoïde

Les injecteurs classiques des moteurs à combustion les injecteurs solénoïdes, également connus sous le nom d'injecteurs électromagnétiques, constituent un type d'injecteur de carburant couramment utilisé dans les moteurs à essence et diesel. Ils fonctionnent selon un principe simple et fiable, utilisant un électroaimant pour ouvrir et fermer un clapet, permettant ainsi de contrôler le débit de carburant vers la chambre de combustion. La figure I.4. résume ce principe. [5]

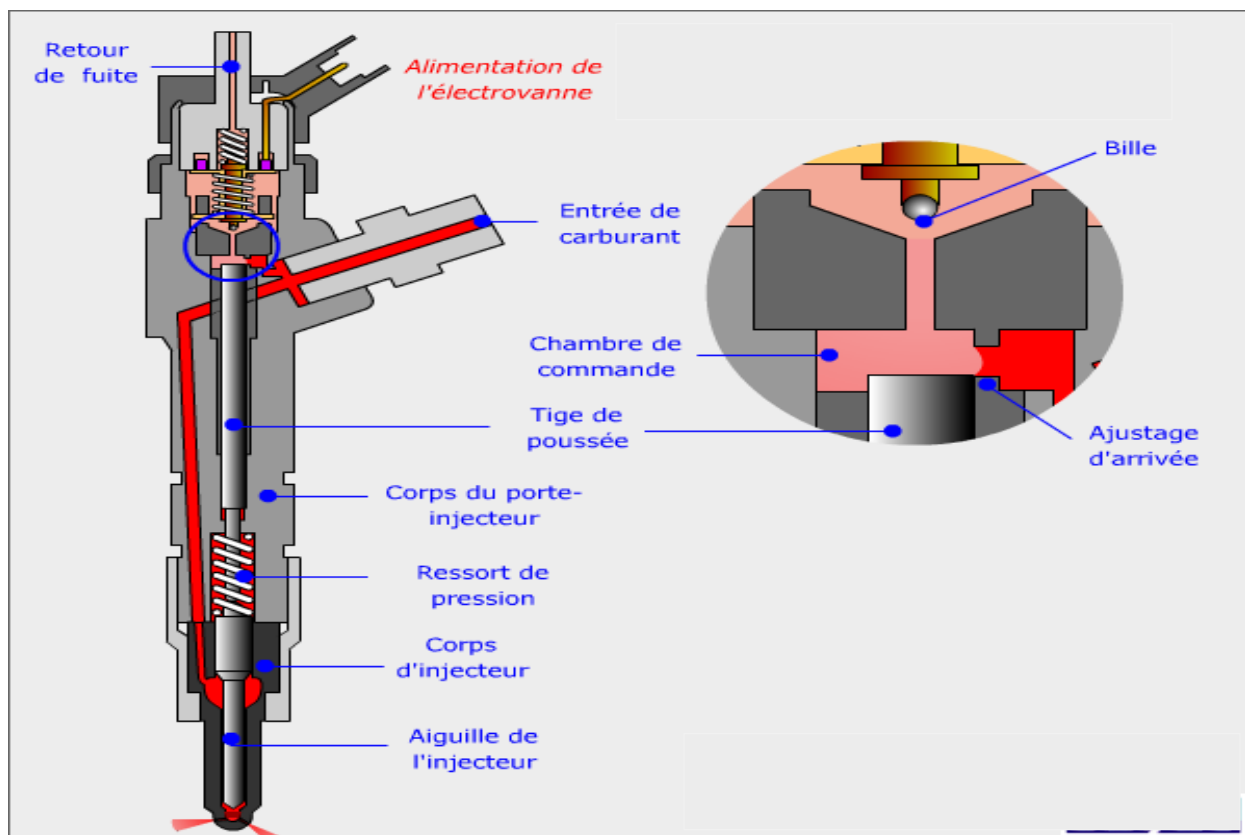


Figure I4: Injecteur électrique à électrovanne

4.2.1.1 Fonctionnement des injecteurs solénoïdes : [5]

- **Électroaimant** : Au cœur de l'injecteur solénoïde se trouve un électroaimant. Lorsqu'un courant électrique est appliqué à l'électroaimant, il génère un champ magnétique.
- **Noyau** : Un noyau ferromagnétique mobile est situé à l'intérieur de l'électroaimant. Lorsque le champ magnétique est activé, il attire le noyau vers le haut.
- **Aiguille de pulvérisation** : Le noyau est relié à une aiguille de pulvérisation fine qui obstrue l'orifice de sortie de l'injecteur.
- **Ouverture du clapet** : Lorsque le noyau est attiré vers le haut, il soulève l'aiguille de pulvérisation, libérant ainsi un passage pour le carburant sous pression.
- **Fermeture du clapet** : Lorsque le courant électrique est interrompu, le champ magnétique s'affaiblit, et un ressort ramène le noyau et l'aiguille de pulvérisation vers leur position initiale, fermant ainsi le clapet et stoppant le débit de carburant.

4.2.1.2 Avantages des injecteurs solénoïdes :

- **Simplicité** : Leur conception simple et robuste les rend fiables et faciles à entretenir.
- **Coût** : Ils sont généralement moins chers que les injecteurs piézoélectriques plus récents.
- **Compatibilité** : Ils sont compatibles avec une large gamme de moteurs à essence et diesel.

4.2.1.3 Applications des injecteurs solénoïdes :

- **Moteurs à essence**: Les injecteurs solénoïdes sont le type d'injecteur le plus répandu dans les moteurs à essence, présents dans la plupart des véhicules sur route.
- **Moteurs diesel**: Bien que moins courants que dans les moteurs à essence, les injecteurs solénoïdes sont également utilisés dans certains moteurs diesel, particulièrement les modèles anciens ou moins performants.

4.2.2 Les injecteurs piézoélectriques

Les injecteurs piézoélectriques sont un type d'injecteur de carburant utilisé dans les moteurs diesel. Ils utilisent des cristaux piézoélectriques pour ouvrir et fermer la vanne de l'injecteur, ce qui permet un contrôle plus précis et plus rapide du débit de carburant que les injecteurs solénoïdes traditionnels. Cela se traduit par une meilleure combustion, des émissions réduites et un fonctionnement plus silencieux du moteur. La figure I.5. résume ce principe. [6]

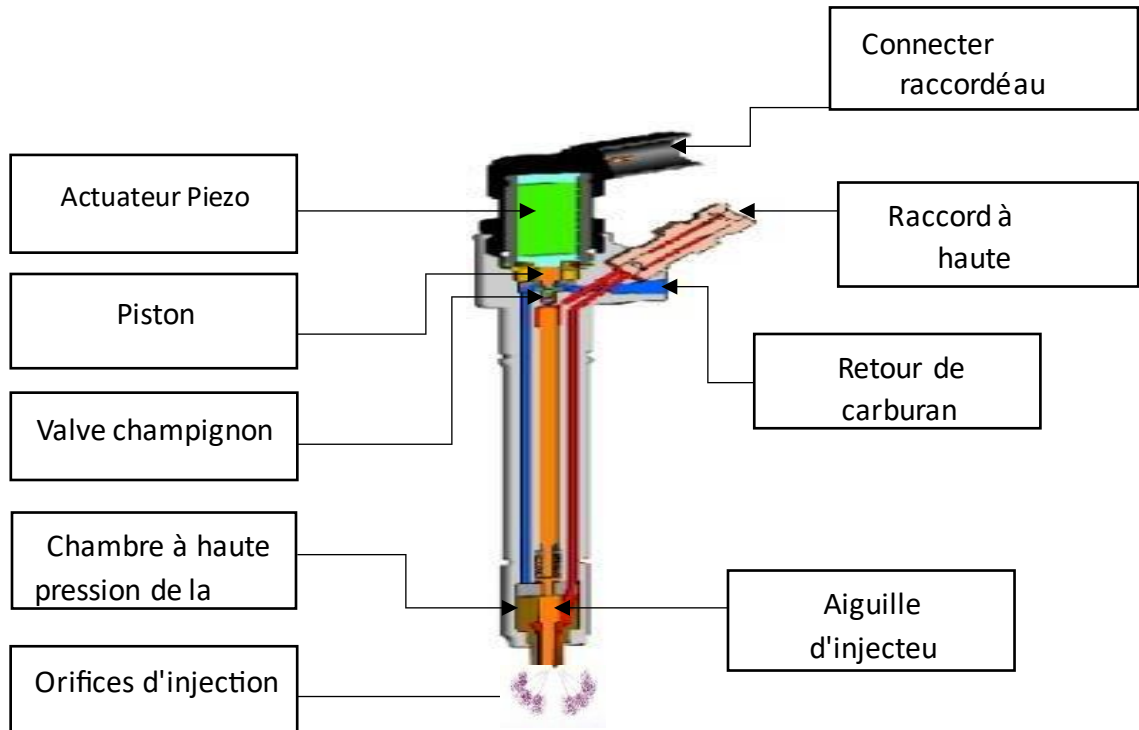


Figure I.5: injecteurs piézoélectriques

4.2.2.1 Comment fonctionnent les injecteurs piézoélectriques

Les injecteurs piézoélectriques fonctionnent en utilisant l'effet piézoélectrique. L'effet piézoélectrique est une propriété de certains matériaux, tels que les cristaux piézoélectriques, qui changent de forme lorsqu'une tension électrique leur est appliquée. Dans les injecteurs piézoélectriques, un cristal piézoélectrique est utilisé pour ouvrir et fermer la vanne de l'injecteur. Lorsqu'une tension électrique est appliquée au cristal, il se déforme et ouvre la vanne. Lorsque la tension est retirée, le cristal reprend sa forme d'origine et ferme la vanne. [6]

4.2.2.2 Avantages des injecteurs piézoélectriques :

- **Meilleure combustion** : Les injecteurs piézoélectriques peuvent fournir plusieurs injections par cycle de combustion, ce qui permet une combustion plus complète du carburant et une réduction des émissions.
- **Émissions réduites** : La combustion plus complète du carburant entraîne une réduction des émissions de NOx, de suies et d'autres polluants.
- **Fonctionnement plus silencieux** : Les injecteurs piézoélectriques fonctionnent plus silencieusement que les injecteurs solénoïdes traditionnels car ils ont moins de pièces mobiles.
- **Plus grande durabilité** : Les injecteurs piézoélectriques sont généralement plus durables que les injecteurs solénoïdes car ils ont moins de pièces susceptibles de s'user ou de tomber en panne. Avantages des injecteurs piézoélectriques :

4.2.2.3 Application des injecteurs piézoélectriques :

Les injecteurs piézoélectriques sont largement utilisés dans de nombreuses applications, notamment :

- **Moteurs diesel** : Les moteurs diesel constituent la principale application des injecteurs piézoélectriques, en raison de leur capacité à améliorer l'efficacité de la combustion et à réduire les émissions, répondant ainsi aux exigences de normes environnementales strictes.
- **Systèmes d'injection directe d'essence** : les injecteurs piézoélectriques sont utilisés dans certains systèmes d'injection directe d'essence, où ils offrent les avantages d'un contrôle précis de la quantité de carburant et du calage de l'injection.
- **Applications industrielles** : les injecteurs piézoélectriques sont utilisés dans certaines applications industrielles, telles que les systèmes de gicleurs et les systèmes de contrôle hydraulique. [7]

4.2.3 Injection directe

Le gasoil est injecté directement dans la chambre de combustion généralement creusée dans la tête du piston et de forme hémisphérique, cette construction permet:

- ❖ D'avoir des parois particulièrement chaudes, renfermant le maximum de volume dans un minimum de surface externe assurant ainsi une combustion rapide.
- ❖ De donner une turbulence à l'air permettant ainsi de mettre chaque molécule de gasoil en contact rapide et renouvelé avec l'oxygène.

Le gasoil doit évidemment être bien pulvérisé (injecteur trous) et pénétrer avec forte pression dans la masse d'air comprimé (plus de 150 bars). Ce type d'injection équipe pratiquement tous les moteurs de poids lourds. [8]

4.2.4 Injection indirecte

La combustion dans les moteurs à injection indirecte, ou à préchambre, est organisée en deux étapes distinctes:

- ❖ Combustion très incomplète en mélange riche dans la préchambre. Dans cette étape, la combustion est pilotée par l'interaction du jet de combustible avec l'air présent dans la préchambre
- ❖ Complément de combustion dans la chambre principale. Dans cette étape, la combustion est pilotée par l'interaction du jet de gaz chaud, contenant beaucoup d'imbrûlés et provenant de la préchambre, avec l'air frais comprimé contenu dans le cylindre. Le point fort du procédé de combustion réside dans le haut niveau d'énergie cinétique du jet de gaz issu de la préchambre qui rend très efficace son mélange à l'air frais et active la fin de combustion. La préchambre de combustion, ménagée dans la culasse, a une forme qui dépend de la méthode de mélange utilisée. La présence de la préchambre apporte au moteur :
- ❖ L'avantage de ne nécessiter qu'une injection à pression modérée (le mélange assuré dans la préchambre peut rester imparfait).
- ❖ L'inconvénient de pénaliser le rendement du moteur à cause des pertes thermiques supplémentaires, occasionnées par le contact des gaz très chauds avec les parois de la préchambre, et des pertes pneumatiques provoquées par le transfert en aller et retour par le canal de communication.

La chambre principale se présente sous la forme d'un disque (espace situé entre le piston et la culasse), auquel s'ajoutent les détails de forme du dessus du piston, qui présente souvent des

singularités en vis-à-vis du canal qui relie la chambre principale à la préchambre. La présence systématique d'une bougie de préchauffage dans la préchambre, maintenue très chaude par la combustion réalisée en zone riche, permet d'assister l'inflammation et limite le bruit de combustion. [8]

4.3 Fonctionnement

Le fonctionnement d'un système d'injection diesel peut varier selon le type spécifique de système utilisé (par exemple, injection directe, injection indirecte, injection à rampe commune, etc.), mais voici une explication générale du fonctionnement d'un système d'injection diesel typique

4.4 Alimentation en carburant

Le carburant diesel est aspiré du réservoir de carburant par une pompe à carburant. Il passe ensuite par un filtre à carburant pour éliminer les impuretés avant d'entrer dans le système d'injection.

4.5 Pressurisation du carburant

Une fois filtré, le carburant est comprimé à une pression élevée par la pompe à carburant. Cette pressurisation est essentielle pour garantir une pulvérisation fine du carburant lors de son injection dans les cylindres du moteur.

4.6 Combustion

Une fois que le carburant est injecté dans le cylindre, il se mélange à l'air comprimé par le piston. La chaleur générée par la compression de l'air entraîne l'allumage spontané du carburant diesel, sans nécessiter de bougie d'allumage. Ce processus de combustion génère de la chaleur et de l'énergie, propulsant ainsi le piston vers le bas et entraînant la rotation de l'arbre moteur.

5. l'unité de commande électronique (calculateur des commandes du moteur) de Véhicule

De nombreux systèmes d'injection diesel modernes sont contrôlés électroniquement par une unité de contrôle moteur (ECU). L'ECU surveille divers paramètres du moteur tels que la vitesse, la charge, la température, etc., et ajuste en conséquence le moment et la durée de l'injection

de carburant pour optimiser la performance du moteur et réduire les émissions. La figure I.6. résume ce principe. [9]

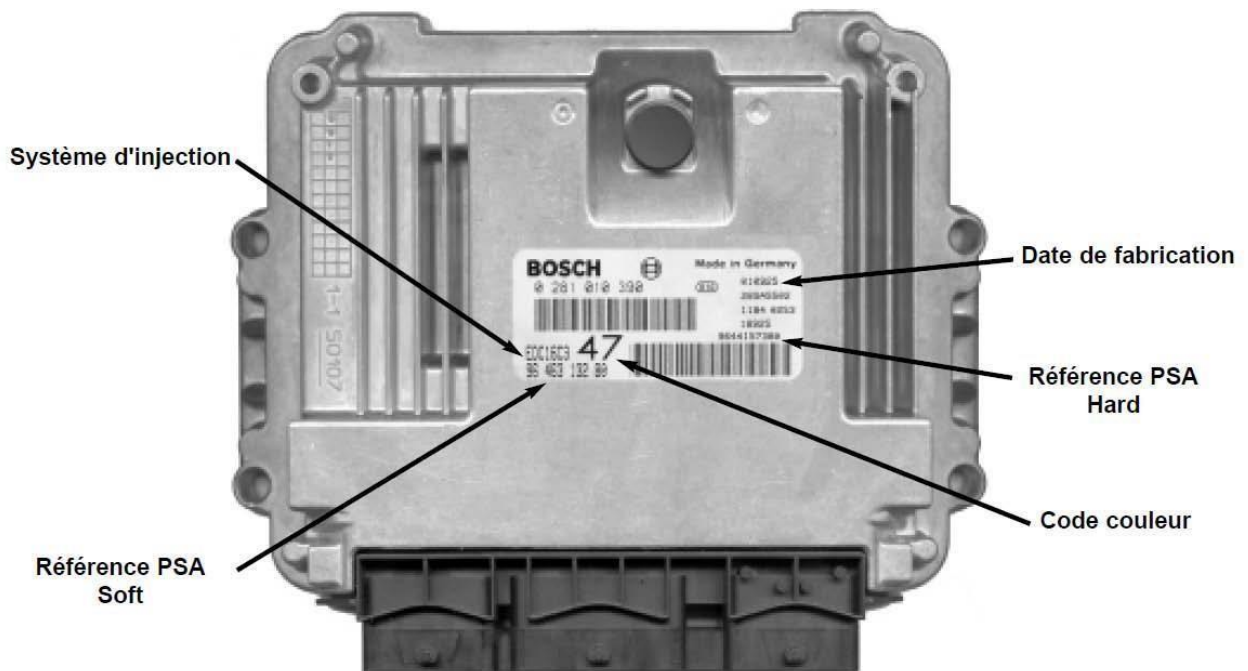


Figure I.6: l'unité Contrôle électronique

5.1 Fonctionnement

L'unité de contrôle électronique (ECU) joue un rôle crucial dans le fonctionnement des moteurs diesel modernes. Voici une explication générale de son fonctionnement :

5.2 Surveillance des capteurs

L'ECU surveille en permanence divers capteurs installés sur le moteur et dans le véhicule pour recueillir des données sur des paramètres tels que la vitesse du moteur, la température du liquide de refroidissement, la pression du carburant, la charge du moteur, etc.

5.3 Traitement des données

Une fois que les données sont collectées par les capteurs, l'ECU les traite à l'aide d'algorithmes et de logiciels intégrés pour prendre des décisions concernant le fonctionnement optimal du moteur.

5.4 Contrôle de l'injection de carburant

L'ECU détermine le moment et la quantité d'injection de carburant nécessaires en fonction des données des capteurs et des conditions de fonctionnement du moteur. Il envoie ensuite des signaux aux injecteurs de carburant pour effectuer les injections de carburant appropriées.

6. Inconvénients

6.1 Inconvénients des injecteurs solénoïdes : [10]

- **Temps de réponse** : Comparés aux injecteurs piézoélectriques, les injecteurs solénoïdes ont un temps de réponse plus lent, ce qui peut limiter la précision de l'injection, surtout à haut régime.
- **Bruit** : Le mouvement mécanique du noyau peut générer du bruit, les rendant légèrement plus bruyants que les injecteurs piézoélectriques.
- **Usure** : Au fil du temps, les composants mécaniques peuvent s'user, ce qui peut affecter la précision et la durabilité de l'injecteur.

6.2 Inconvénients des injecteurs piézoélectriques : [11]

- **Plus cher** : Les injecteurs piézoélectriques sont plus chers que les injecteurs solénoïdes traditionnels.
- **Plus complexe** : La technologie des injecteurs piézoélectriques est plus complexe que celle des injecteurs solénoïdes traditionnels, ce qui peut les rendre plus difficiles à entretenir et à réparer.
- **Plus sensible aux contaminants** : Les injecteurs piézoélectriques sont plus sensibles aux contaminants dans le carburant que les injecteurs solénoïdes traditionnels, ce qui peut entraîner des problèmes de performances.

7. Conclusion

Le fonctionnement du système d'injection diesel implique plusieurs étapes critiques pour garantir le bon fonctionnement du moteur. Tout d'abord, le système est chargé d'alimenter le moteur en carburant, puis de le comprimer à haute pression avant de l'injecter dans les cylindres. Ce processus démarre le processus de combustion nécessaire au fonctionnement d'un moteur

diesel. Cependant, si un dysfonctionnement du système survient, notamment des fuites ou des problèmes d'injection, cela peut entraîner un rejet de gaz polluants dans l'environnement et détériorer les performances du moteur diesel. Mais nous expliquerons dans le deuxième chapitre comment concevoir le système d'injection diesel pour détecter et corriger ces défauts grâce à des mécanismes de contrôle et de réglage intégrés. En outre, Comprend l'unité de commande électronique (ECU) est l'unité de commande d'un système de gestion de moteur diesel moderne, surveillant et contrôlant divers aspects du fonctionnement du moteur pour garantir des performances optimales, une efficacité maximale et minimiser l'impact environnemental de l'utilisation du moteur diesel.

Chapitre II: Systèmes De Diagnostics D'injection Diesel

1. Introduction

Les systèmes de diagnostic d'injection diesel jouent un rôle crucial dans le maintien et l'optimisation des performances des moteurs diesel modernes. Les bancs de test pour injecteurs Common Rail sont des équipements spécialisés utilisés pour diagnostiquer et évaluer les performances des injecteurs Common Rail.

Les injecteurs sont un composant crucial des moteurs diesel modernes, responsables de la mesure et de l'injection précises du carburant dans les cylindres du moteur à haute pression. Ces bancs de test simulent des conditions de fonctionnement réelles pour les injecteurs, permettant aux techniciens d'évaluer des facteurs tels que, le motif de pulvérisation et l'atomisation du carburant, le débit et la distribution du carburant, le temps de réponse et les caractéristiques d'ouverture/fermeture de l'injecteur. Ces systèmes sont essentiels pour diagnostiquer, identifier et résoudre les problèmes liés aux composants d'injection de carburant, assurant ainsi une efficacité maximale, une consommation réduite de carburant et une diminution des émissions polluantes.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les informations techniques liées à la commande et aux tests types des injecteurs diesel.

Ainsi, nous allons présenter les standards appliqués aux injecteurs ainsi que leurs types et les circuits associés de commande.

2. Standards de tests des injecteurs diesels

Les injecteurs diesel jouent un rôle crucial dans les performances du moteur, affectant la puissance, la consommation de carburant et les émissions. Pour garantir leur bon fonctionnement et leur conformité aux normes environnementales, il existe plusieurs normes de test utilisées dans l'industrie automobile. Voici quelques-unes des normes les plus courantes :

2.1 ISO Normes relatives aux injecteurs diesel :

- ISO 4126-1 (l'Organisation internationale de normalisation) : Cette norme spécifie les méthodes d'essai pour la détermination du débit caractéristique des injecteurs d'injection de carburant à commande mécanique pour moteurs à combustion interne. Elle définit les conditions d'essai, les appareils de mesure et les méthodes de calcul des débits de carburant. [12]

- ISO 4126-2 (l'Organisation internationale de normalisation) : Cette norme est similaire à la ISO 4126-1, mais elle s'applique spécifiquement aux injecteurs à commande électronique. Elle définit les méthodes d'essai pour mesurer le débit massique de carburant en fonction de la pression d'alimentation et de la tension de commande. [13]
- ISO 14583 (l'Organisation internationale de normalisation) : Cette norme spécifie les méthodes d'essai pour la détermination de l'indice de cavitation des injecteurs d'injection de carburant pour moteurs à combustion interne. La cavitation est un phénomène indésirable qui peut endommager les injecteurs et affecter les performances du moteur. Cette norme permet d'évaluer la résistance des injecteurs à la cavitation. [14]

2.1.1 Normes SAE pour les injecteurs diesel:

- SAE J1733 (Société des ingénieurs automobiles) : Cette norme de la Society of Automotive Engineers (SAE) spécifie les procédures d'essai pour les injecteurs à rampe commune utilisés dans les moteurs à allumage par compression. Elle définit les méthodes de mesure du débit massique de carburant, du temps de réponse et du modèle de pulvérisation. [15]
- SAE J1840 (Société des ingénieurs automobiles) : Cette norme SAE spécifie les procédures d'essai pour les injecteurs à pilot injection utilisés dans les moteurs diesel modernes. Le pilot injection est une technique d'injection en deux étapes qui permet de réduire les émissions et le bruit du moteur. Cette norme définit les méthodes de mesure du débit massique de carburant et du timing du pilot injection. [16]

2.1.2 Normes spécifiques des constructeurs automobiles:

- En plus des normes ISO et SAE, de nombreux constructeurs automobiles ont leurs propres normes internes pour les tests d'injecteurs diesel. Ces normes tiennent compte des spécifications et des tolérances des injecteurs utilisés dans leurs moteurs particuliers.

2.1.3 Importance des normes de test :

Les normes de test des injecteurs diesel jouent un rôle important dans plusieurs aspects :

- Contrôle de la qualité : Elles garantissent que les injecteurs répondent aux exigences de performance et de durabilité.
- Conformité réglementaire : Elles permettent aux fabricants de démontrer que leurs moteurs respectent les normes d'émission.

2.2 Caractéristiques des injecteurs diesel

Pendant la phase de développement d'un injecteur à rampe commune, chaque injecteur d'une référence spécifique subit un processus appelé "cartographie". Durant ce processus, l'injecteur fonctionne à une pression de rampe fixe. La durée d'activation est augmentée de 0 μs jusqu'à la durée maximale d'activation par paliers de 10 μs . À chaque palier, la quantité de carburant injecté est mesurée et reportée sur un graphique. À partir de cette "carte", les points de test et les valeurs d'étalonnage moteur sont déterminés, car un injecteur peut fonctionner à n'importe quelle combinaison de pression et de durée d'activation. Un exemple de carte est présenté ci-dessous.

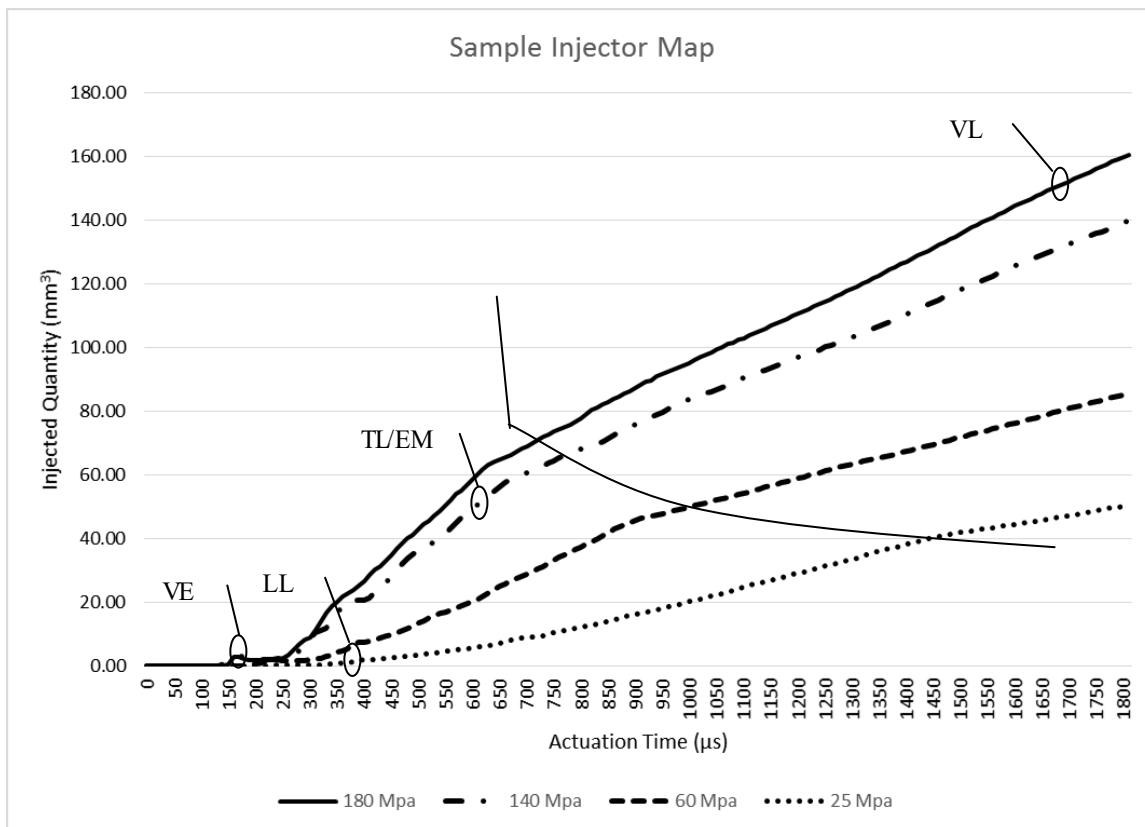


Figure II.1: Plan de la carte injecteur [17]

Malheureusement, réaliser une cartographie d'injection sur chaque injecteur serait très chronophage. Avec les équipements de test de production, la cartographie d'un injecteur peut prendre plus de 2 heures selon le nombre de pressions cartographiées. En effet, chaque courbe de pression mesure la quantité de carburant injecté à 180 points ou plus (certaines cartographies constructrices en utilisent 10 différentes) En se basant sur ces tests, Bosch et le constructeur automobile s'entendent sur 4 points ou plus sur la carte pour mesurer les performances de l'injecteur et vérifier s'il respecte les spécifications. La figure 1 résume ce principe.

2.3 Points de test standard

Les quatre points de test standards d'un injecteur diesel sont comme suit :

VL - Pleine Charge (Full Load - VL)

Ce point peut être identifié par un temps d'actionnement long, typiquement $> 1400 \mu\text{s}$ et une pression de rail égale à la pression maximale de rampe de l'injecteur. C'est le seul point où la valeur de la quantité renvoyée par l'injecteur se mesure en agissant. Cette mesure est effectuée dans la zone d'injection non balistique. [17]

Ce test confirme :

- Débit maximal de carburant de l'injecteur
 - Batterie faible
 - Le moteur souffre d'un excès de carburant
- Quantité de retour excessive
 - Faible pression du rail
 - Début difficile

VE – Pré-injection

Ce point peut être identifié par un temps d'actionnement très court, typiquement $< 270 \mu\text{s}$ et une pression de rail égale à la pression maximale de rampe de l'injecteur. Cela vérifie que l'injecteur est capable de fournir constamment du carburant au temps d'actionnement minimum recommandé. C'est presque toujours au début de la courbe plate.

Ce test confirme que les composants de l'injecteur sont capables de réagir au temps d'actionnement minimum. Dans le cas contraire, nous allons constater un des symptômes suivants :

- fumée blanche
- Ratés d'allumage
- Bruit du moteur
- Problèmes de post-traitement

TL – Chargement partiel / EM – Point d'émission

Ces points peuvent être identifiés par un temps d'actionnement, typiquement compris entre 400 et 800 μ s et une pression de rail En dessous de la pression maximale de rampe de l'injecteur. La sélection des points de test est celle du fabricant spécifique. Généralement, ils recherchent des points critiques dans l'étalonnage du moteur, notamment dans la zone de fonctionnement de l'injecteur. [17]

Ce test confirme des points spécifiques de la carte de performances convenus par le constructeur OEM et Bosch. En cas de non-conformité, nous constatons :

- Performances milieu de gamme
- Ratées
- Fumée

LL –Inactif

Le nom de ce point est un peu trompeur. Bien que ce soit appelé « ralenti », il ne s'agit pas d'un point de ralenti du moteur. Ce le point peut être identifié par un temps d'actionnement, généralement compris entre 300 et 400 μ s à une pression de rail juste Au-dessus de la pression minimale de rampe de fonctionnement de l'injecteur. Il s'agit d'examiner les forces de friction au sein du l'injecteur et de déterminer s'il existe des forces excessives sur les pièces mobiles de l'injecteur qui pourraient Affecte les performances à des pressions modérées sur les rails

Ce test confirme des points spécifiques de la carte de performances convenus par le constructeur OEM et Bosch. En cas de non-conformité, nous allons constater :

- Performances de milieu de gamme
- Ratées

- Fumée

2.4 Codification et Base de Données pour Injecteurs Diesels

Le codage et les bases de données font partie des éléments de base sur lesquels ces entreprises s'appuient (Bosch, Delphi, Denso, Siemens) pour garantir une injection de carburant précise et contrôlée au moyen d'injecteurs solénoïdes et piézoélectriques, ce qui contribue à une combustion optimale, à l'augmentation des performances du moteur et à la réduction des émissions polluantes. Ces technologies permettent aux moteurs diesel d'atteindre une plus grande efficacité et de meilleures performances environnementales.

2.4.1 Codification :

Chaque injecteur solénoïdes et piézoélectriques possède un code unique gravé sur son corps ou stocké dans sa mémoire interne. Ce code, généralement composé d'une combinaison de lettres et de chiffres, contient des informations cruciales pour l'ECU (Unité de Commande du Moteur).

Ces codes ainsi que les informations en liaison sont souvent regroupés dans des bases de données propres aux fabricant. La position de la référence de l'injecteur sur les pièces même varie en fonction du fabricant de l'injecteur. Voici quelques indications sur l'emplacement de la référence de l'injecteur pour les quatre principaux fabricants d'injecteurs : Bosch, Delphi, Denso et Siemens.

2.4.2 Base de Données :

1. Injecteur Bosch

La référence de l'injecteur Bosch se trouve habituellement sur la tête de l'injecteur, près de la connexion de la fiche électrique. La référence commence souvent par '0445', suivi d'une série de chiffres. Par exemple, '0445 110 XXX' ou '0445 120 XXX' comme montre la figure II. 2.



Figure II. 2: Références des injecteurs BOSCH [18]

2. Injecteur Delphi

Pour les injecteurs Delphi, la référence est traditionnellement trouvée sur une étiquette collée sur le côté de l'injecteur. La référence commence généralement par 'EJBR', suivi d'une série de chiffres. Par exemple, 'EJBR 3801D' ou 'EJBR 1701Z', comme montre la figure II. 3.



Figure II.3: Références des injecteurs Delphi [19]

3. Injecteur Dense

La référence de l'injecteur Dense est majoritairement située sur le côté de l'injecteur. Par exemple, la référence peut être '23670-26060-AC', comme montre la figure II. 4.



Figure II.4: Références des injecteurs Dense [20]

4. Injecteur Siemens VDO (Continental)

Pour les injecteurs Siemens, la référence se trouve la plupart du temps sur le dessus de l'injecteur. La référence commence en général par '5WS' ou '96', H82, A2C ou 03L, suivi d'une série de chiffres. Par exemple, '50274V05' ou '9647247280', comme montre la figure II. 5.



Figure II.5: Références des injecteurs Siemens [21]

3. Commande des injecteurs diesels

Il existe deux types d'injecteurs qui diffèrent par leur système d'ouverture. Les injecteurs solénoïdes et piézoélectriques sont des composants cruciaux dans les moteurs diesel modernes, responsables du contrôle précis de l'injection de carburant dans les chambres de combustion. Bien

qu'ils partagent le même objectif, ils diffèrent par leurs mécanismes et leurs principes de fonctionnement.

3.1 Injecteur solénoïde (électromagnétique)

3.1.1 Constitution de l'injecteur solénoïde (électromagnétique)

L'injecteur à solénoïde. Il se compose d'une ligne d'accès du carburant, d'une ligne de retour du carburant, d'une ligne de commande, de deux ressorts, d'un solénoïde et d'une aiguille. Tous ces éléments sont présentés sur la figure II. 6. [22]

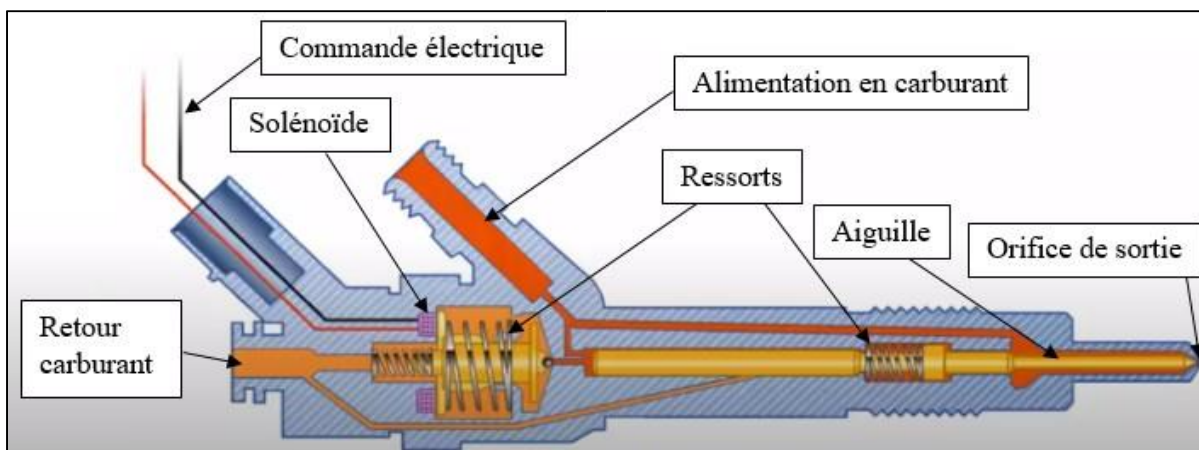


Figure II.6: Composition L'injecteur électromagnétique [22]

- **Bobine de solénoïde (Bobine de l'électroaimant):** Bobine électrique composée d'enroulements de fils de cuivre isolés. Lorsqu'il est alimenté par un courant électrique, il génère un champ magnétique.
- **Aiguille d'injecteur:** Composant ferromagnétique, généralement en fer doux, qui se déplace en réponse au champ magnétique généré par la bobine solénoïde.
- **Commande électrique:** Un connecteur électrique qui permet à l'injecteur de recevoir des signaux de l'unité de commande électronique (ECU) du moteur.

3.1.2 Composition de Bobine de l'électroaimant

Une bobine de solénoïde est un composant crucial de l'électroaimant, responsable de la génération du champ magnétique. Elle se compose de plusieurs éléments essentiels qui travaillent ensemble pour produire une force électromagnétique. Comme montre la figure II.7. [23]

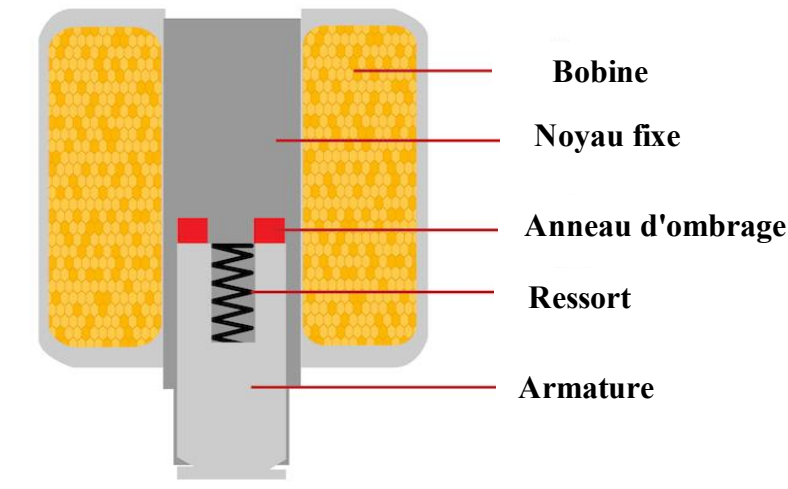


Figure II.7 Schéma d'une bobine de solénoïde [23]

❖ **les éléments du solénoïde sont les suivants :**

- **Bobine (A) :** Un fil de cuivre étroitement enroulé autour du noyau fixe.
- **Noyau stationnaire (B) :** Un cylindre ferromagnétique
- **Anneau d'ombrage (C) :** Un anneau d'ombrage, ou bobine d'ombrage, est un tour ou quelques tours d'un conducteur électrique (cuivre ou aluminium).
- **Printemps (D) :** Ressort en acier inoxydable qui ramène l'armature à sa position normale lorsque la bobine est hors tension.
- **Armature (E) :** Partie du noyau fixe qui se déplace lorsque la bobine est alimentée, également appelée plongeur du solénoïde.

3.1.2.1 Fonctionnement d'un injecteur solénoïde

Un champ magnétique se forme lorsque le courant circule dans la bobine d'un solénoïde. L'intensité du champ est directement proportionnelle au courant, au nombre d'enroulements et à la perméabilité du matériau ferromagnétique du noyau stationnaire. Le noyau fonctionne comme un

circuit magnétique pour le champ magnétique. En d'autres termes, le noyau agit comme un chemin fermé qui confine le champ magnétique.

Le champ magnétique induit une force sur l'armature qui la tire vers le haut ou la pousse vers le bas. La norme est de tirer l'armature vers le haut, mais en prolongeant le côté de l'armature proche du noyau stationnaire avec une tige de poussée, le champ pousse l'armature vers le bas. Dans les deux cas, un ressort est comprimé. L'armature reste en position tant que le champ reste en place. Lorsque le champ se dissipe, le ressort ramène l'armature dans sa position initiale.

Enfin, l'anneau d'ombrage fournit un chemin à faible impédance pour une pointe de haute tension générée lorsque le champ magnétique se dissipe. Cela diminue l'amplitude et la durée de la pointe de tension, ce qui protège le circuit.

3.1.2.2 Bobines d'électro-aimants à courant continu et à courant alternatif

Il y a des avantages et des inconvénients à travailler avec des solénoïdes à courant continu ou à courant alternatif. Un solénoïde à courant continu fonctionne comme expliqué ci-dessus.

Le courant continu qui traverse un solénoïde crée une force magnétique suffisamment puissante pour vaincre la force du ressort et soulever l'armature dans la bobine. Lorsque la bobine se désexcite, le ressort repousse l'armature vers le bas.

Les bobines de courant alternatif sont plus complexes car le courant alternatif modifie la polarité. Deux fois par période, le courant est nul, ce qui fait que la force magnétique est nulle. Comme la force du ressort pousse constamment l'armature vers le bas, celle-ci vibre, produit un bourdonnement et sollicite les composants.

Pour résoudre ce problème, un anneau de cuivre autour de l'armature stocke une partie de l'énergie magnétique, réduisant ainsi les vibrations.

Lorsque la force magnétique surmonte la force du ressort et que l'armature est entièrement soulevée, le courant circulant dans la bobine peut être réduit pour économiser de l'énergie.

Le courant continu réagit plus lentement que le courant alternatif, et les bobines en courant alternatif sont donc plus efficaces sur le plan énergétique.

3.1.2.3 Formule du champ magnétique d'un solénoïde

Le champ magnétique d'une bobine de solénoïde dépend du nombre de spires par unité de longueur, de l'intensité du courant qui traverse la bobine et de la perméabilité du matériau du solénoïde. la formule pour mesurer l'intensité du champ est la suivante : [23]

$$B = \mu_0 \frac{IN}{L}$$

- **B** : la densité du flux magnétique
- **μ_0** : La constante de perméabilité qui est de $12,57 \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$
- **I** : Le courant traversant la bobine
- **N** : Le nombre de tours
- **L** : Longueur de la bobine

3.1.2.4 Equilibre des forces de l'électrovanne

Le principe de base d'une électrovanne est un équilibre entre la force magnétique du solénoïde d'une part, et la pression du fluide et la force du ressort d'autre part comme le montre la figure II 8.

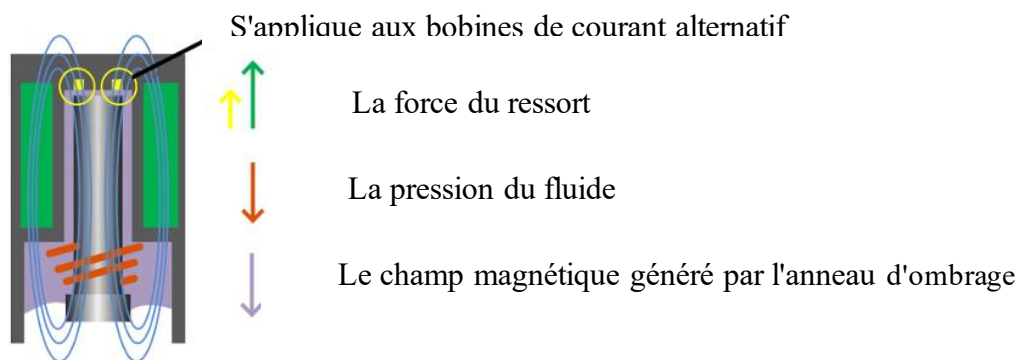


Figure II.8: Pour contrôler le débit, une électrovanne utilise un équilibre des forces entre le champ magnétique de la bobine [23]

Le principe de base d'une électrovanne est un équilibre entre la force magnétique du solénoïde d'une part, et la pression du fluide et la force du ressort d'autre part. Calculez la force magnétique requise pour une électrovanne à commande directe à l'aide de la formule suivante :

- F_s = force du solénoïde (N)
- p = pression (Pa) (10^5 Pa = 1 bar)
- A = orifice (m^2)
- F_{spring} = force du ressort (N)

$$F_s = pA - F_{spring}$$

3.2 L'injecteur Piézo-électrique

3.2.1 Combinaison de l'injecteur Piézo-électrique

Les injecteurs raccordés à la rampe commune rail sont pilotés électriquement par le calculateur de contrôle moteur. Ils injectent et pulvérisent le carburant nécessaire aux différentes phases de fonctionnement du moteur, L'injecteur lui-même est similaire au modèle classique à trous. en revanche, le porte-injecteur est surmonté d'un actuateur piézo-électrique de commande (1) fixé par un gros écrou (2).

L'ouverture des injecteurs est obtenue par un effet de pression différentielle sur la tête de l'injecteur. L'actuateur piézo-électrique est composé de plusieurs centaines de couches de quartz.

Ce cristal à la propriété de se déformer lorsqu'il reçoit une impulsion électrique, c'est l'effet "piézo inversé". Tous ces éléments sont présentés sur la figure II.9. [24]

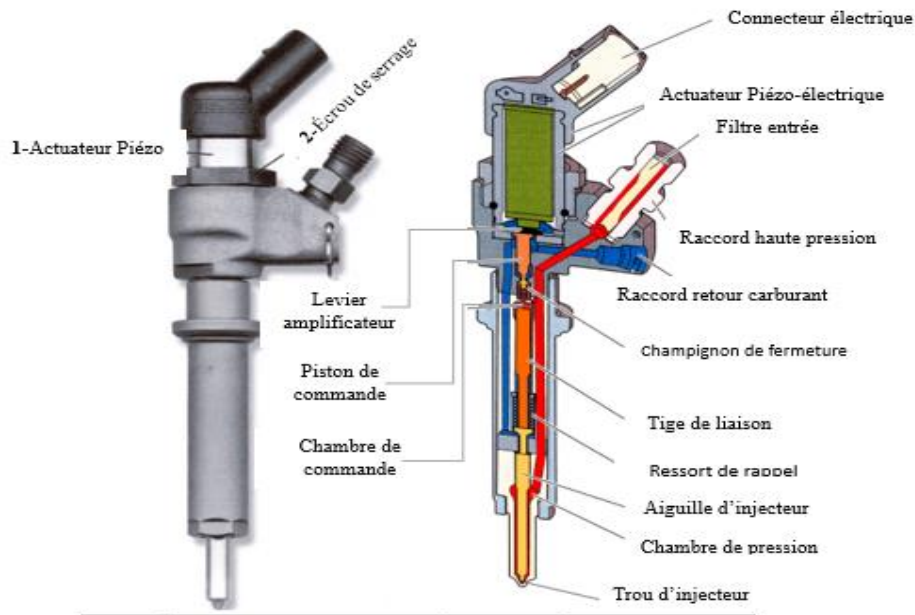
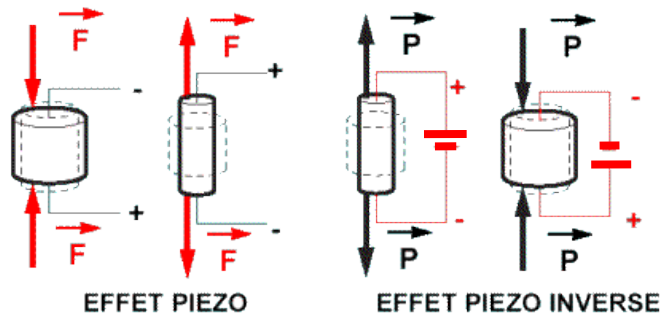


Figure II.9: combinaison l'injecteur Piézo-électrique [24]

- Effet pièze

Si on compresse le matériau, on relèvera une certaine tension à ses bornes. Et inversement, si on étire ce même matériau, on aura une tension de sens inverse. [24]



- Effet pièzo inverse

Si une tension est appliquée sur le matériau, il s'ensuit un allongement du cristal. Et inversement, si une tension de sens inverse est appliquée sur ce matériau, il s'ensuit une contraction du cristal. Une fois déformé, le cristal a besoin d'une nouvelle impulsion de sens inverse pour retrouver son état initial.

Donc, en appliquant un courant alternatif, le cristal se comprime et s'étire. Ce sont ces oscillations qui vont produire le son dans une application d'avertisseur (ou buzzer). Convenablement coupés, ces cristaux ont une fréquence de résonance mécanique bien définie et stable.

Dans le cas des injecteurs piézo-électriques les deux effets sont combinés : Une première couche de quartz est alimentée par le calculateur de contrôle moteur (sous 70 volts), la déformation engendrée va contraindre mécaniquement à son tour la couche adjacente à cette dernière : déformée mécaniquement elle va fournir une tension.

Cette tension va s'ajouter à la tension d'alimentation fournie par le calculateur. Ainsi le phénomène va se reproduire environs 200 fois (suivant le nombre des couches de quartz).

Donc dans le cas des injecteurs piézo-électriques, la tension entraîne une déformation qui à son tour entraîne une tension. Ainsi on passe d'une tension d'alimentation de 70 volts à 140 volts et on obtient une déformation d'environ 50 μ m.

4. Contrôle General des injecteurs diesels

Dans le but d'effectuer un diagnostic correct des injecteurs, il est nécessaire de comprendre et de réaliser une carte de contrôle précise. Ce contrôle doit assurer le test des injecteurs au moins aux niveaux des quatre points standards de test et de comparer les résultats des débits de diesel obtenus avec la fourchette spécifiée par le constructeur. Dans la suite, nous allons examiner les circuits électroniques de contrôles des deux types d'injecteurs

4.1 Contrôle Bobine de injecteur solénoïde

La bobine de l'électroaimant est un composant essentiel des injecteurs diesel. Elle permet de créer un champ magnétique qui pousse l'aiguille de l'injecteur, ce qui ouvre et ferme le passage du gasoil. Comme montre la figure II.10. [25]

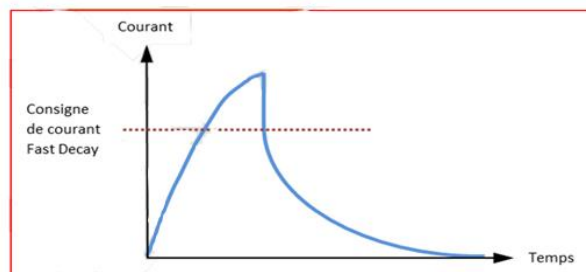
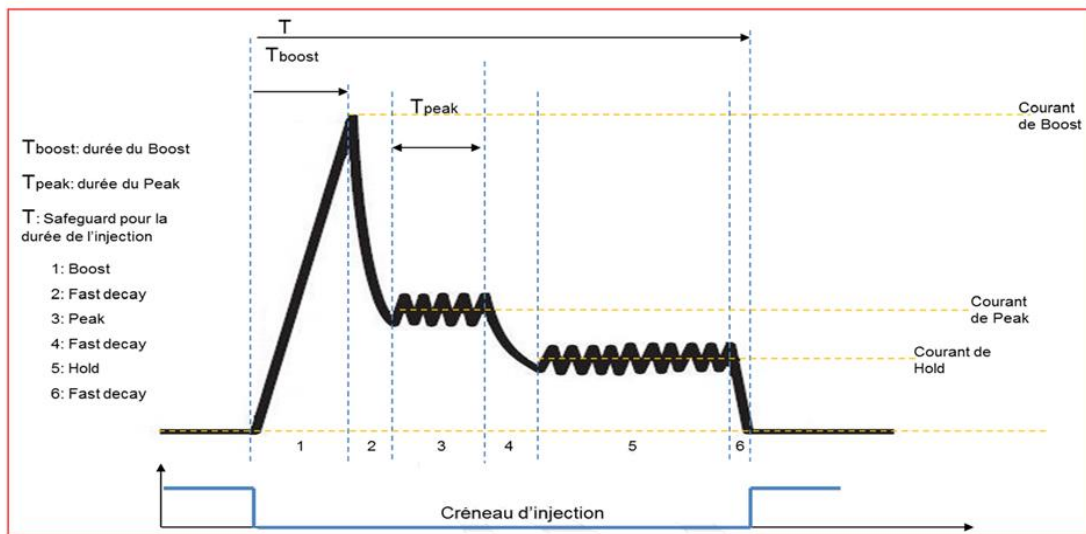


Figure II.10: Allure de courant pour une le type Solénoïde [25]

Dans cette figure, nous distinguons les niveaux de courants suivantes : [25]

- **Courant de Boost** : Consigne de courant, en ampère, pour la phase de Boost de la voie.
- **Courant Fast Decay Boost Peak** : Limite de courant, entre la phase Boost et Peak, au-dessus duquel le courant dans la voie sera descendu rapidement.
- **Durée Peak** : Durée maximale pour la phase Peak.
- **Courant Peak** : Consigne de courant moyen, en ampère, pour la phase de Peak de la voie.
- **Var Courant Peak +/-** : Variation de courant, en ampère, pour la phase de Peak de la voie. Le courant appliqué à la voie sera au maximum égal à la valeur de Courant Peak + Var Courant Peak +/- . La valeur minimum du courant sera égale à la valeur de Courant Peak - Var Courant Peak +/- .
- **Courant Fast Decay Peak Hold** : Limite de courant, entre la phase Peak et Hold, au-dessus duquel le courant dans la voie sera descendu rapidement. Voir les figures 10.
- **Courant Hold** : Consigne de courant moyen, en ampère, pour la phase de Hold de la voie.
- **Var Courant Hold +/-** : Variation de courant, en ampère, pour la phase de Hold de la voie. Le courant appliqué à la voie sera au maximum égal à la valeur de Courant Hold + Var Courant Hold +/- . La valeur minimum du courant sera égale à la valeur de Courant Hold - Var Courant Hold +/- .

4.2 Contrôle de l'injecteur Piézo-électrique

Les injecteurs piézo-électriques sont des composants critiques des moteurs diesel modernes. Ils sont responsables de l'injection précise et contrôlée du carburant dans les chambres de combustion.

Le bon fonctionnement des injecteurs piézo-électriques est essentiel pour garantir les performances et les émissions optimales du moteur. Comme montre la figure II.11. [25]

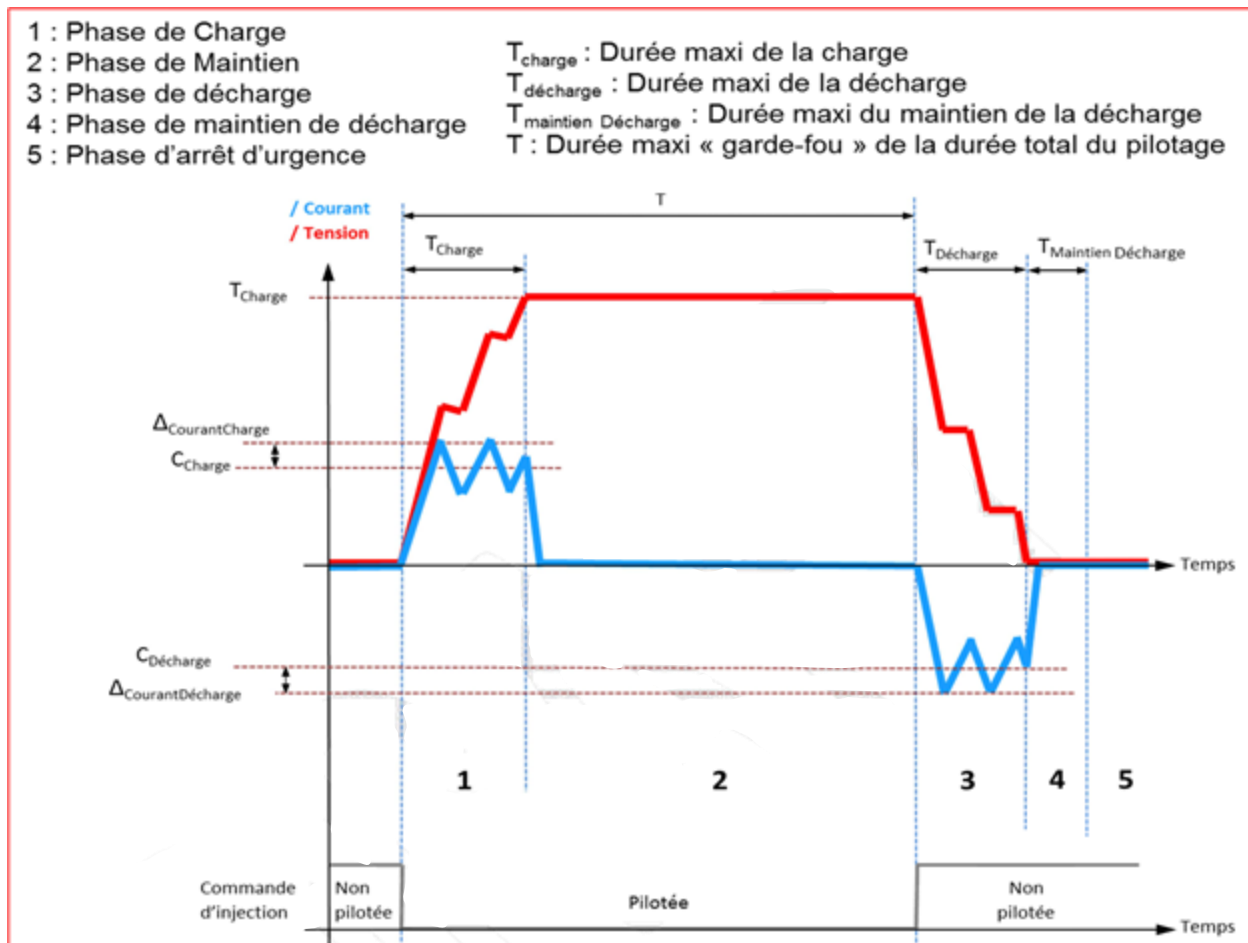


Figure II. 11: Allure du courant et de la tension pour le type Pièze [25]

Dans cette figure, nous distinguons les niveaux de courants suivantes : [25]

- **Courant Charge** : Consigne de courant moyen, en ampère, pour la phase de charge de la voie.
- **Var Courant Charge +/-** : variation de courant, en ampère, pour la phase de charge de la voie. Le courant appliqué à la voie sera au maximum égale à la valeur de Courant Charge + Var Courant Charge +/- . La valeur minimum du courant sera égale à la valeur de Courant Charge - Var Courant Charge +/- .
- **Tension Charge** : Consigne de tension, en volt, à atteindre pour la phase de maintien de la voie ouverte.
- **Var Tension Charge** : Variation de tension, en volt, pour la phase de maintien de l'injecteur ouvert. Exemple : « Tension Charge » réglée à 140V et « Var Tension Charge » réglée à 5V. Si

la tension de charge chute sous le seuil Tension Charge – Var Tension Charge, soit 135V, alors le PSDI recharge la voie jusqu'à 140V.

- **Courant Décharge :** Consigne de courant moyen, en ampère, pour la phase de décharge de la voie.
- **Var Courant Décharge +/- :** Variation de courant, en ampère, pour la phase de décharge de la voie. Le courant appliqué à la voie sera au maximum égale à la valeur de Courant Décharge + Var Courant Décharge +/-: la valeur minimum du courant sera égale à la valeur de Courant Décharge - Var Courant Décharge +/-.
- **Tension Décharge :** Consigne de tension, en volt, à atteindre pour la phase de décharge de la voie.
- **Var Tension Décharge +/- :** Variation de tension, en volt, pour la phase de maintien de la voie fermée. La tension appliquée à l'injecteur sera au maximum égale à la valeur de Tension Décharge + Var Tension Décharge +/- . Et inversement, la valeur minimum de la tension sera égale à la valeur de Tension Décharge - Var Tension Décharge +/-.

5. Conception du circuit électronique de commande

5.1 Le circuit à microcontrôleur

Maintenant que nous avons décrit les types et le contrôle des injecteurs diesel, nous allons consacrer cette partie à la conception d'un circuit électronique pour le contrôle des injecteurs. Nous avons choisis de travailler sur les injecteurs solénoïdes. la carte utilisera des microcontrôleurs de la famille Microchip. le circuit doit nous permettre d'injecter les paramètres de tests qui sont la fréquence et la durée d'activation de la bobine.

5.1.1 Définition générale d'un microcontrôleur :

Un microcontrôleur, également connu sous le nom de microcontrôleur, est un circuit intégré (CI) qui contient tous les composants de base d'un ordinateur sur une seule petite puce. Cela comprend une unité centrale de traitement (CPU), de la mémoire (RAM et ROM), des entrées/sorties (I/O) et des circuits périphériques.

5.1.1.1 Caractéristiques du microcontrôleur PIC18F4550 :

Caractéristiques générales : [26]

- Processeur RISC haute performance : Fonctionne à 20 MHz, ce qui le rend rapide et efficace pour diverses applications.
- Mémoire programme Flash : 32 Ko de mémoire programme reprogrammable, offrant suffisamment d'espace pour stocker des instructions complexes.
- EEPROM de données : 256 octets de mémoire de données réinscriptible, permettant de stocker des données permanentes.
- SRAM de données : 2 048 octets de mémoire tampon de données, offrant un espace de stockage temporaire pour les données variables.
- 35 broches d'entrée/sortie : Peuvent être configurées comme entrées ou sorties à des fins de contrôle variées.
- Alimentation basse consommation : Peut fonctionner avec une tension de 2 à 5,5 volts, ce qui le rend idéal pour les applications sensibles à la consommation d'énergie.

5.1.1.2 Caractéristiques des microcontrôleurs PIC16F874A/77A :

Caractéristiques générales : [27]

- Processeur RISC haute performance : Fonctionnant à 20 MHz, ce qui le rend rapide et efficace pour diverses applications.
- Mémoire programme Flash : 8 Ko de mémoire programme reprogrammable, offrant suffisamment d'espace pour stocker des instructions simples à moyennement complexes.
- EEPROM de données : 256 octets de mémoire de données réinscriptible, permettant de stocker des données permanentes.
- RAM de données : 368 octets de mémoire tampon de données, offrant un espace de stockage temporaire pour les données variables.
- 40 broches d'entrée/sortie : Peuvent être configurées comme entrées ou sorties à des fins de contrôle variées.
- Alimentation basse consommation : Peut fonctionner avec une tension de 2 à 5,5 volts, ce qui le rend idéal pour les applications sensibles à la consommation d'énergie.

5.1.2 Le circuit Électronique

Le microcontrôleur PIC18 reçoit les commandes de l'ordinateur via RS232, et le microcontrôleur PIC16 exécute les commandes en contrôlant l'optocoupleur, qui à son tour supervise la connexion du circuit pour terminer le processus d'injection. Comme montre la figure II.12.

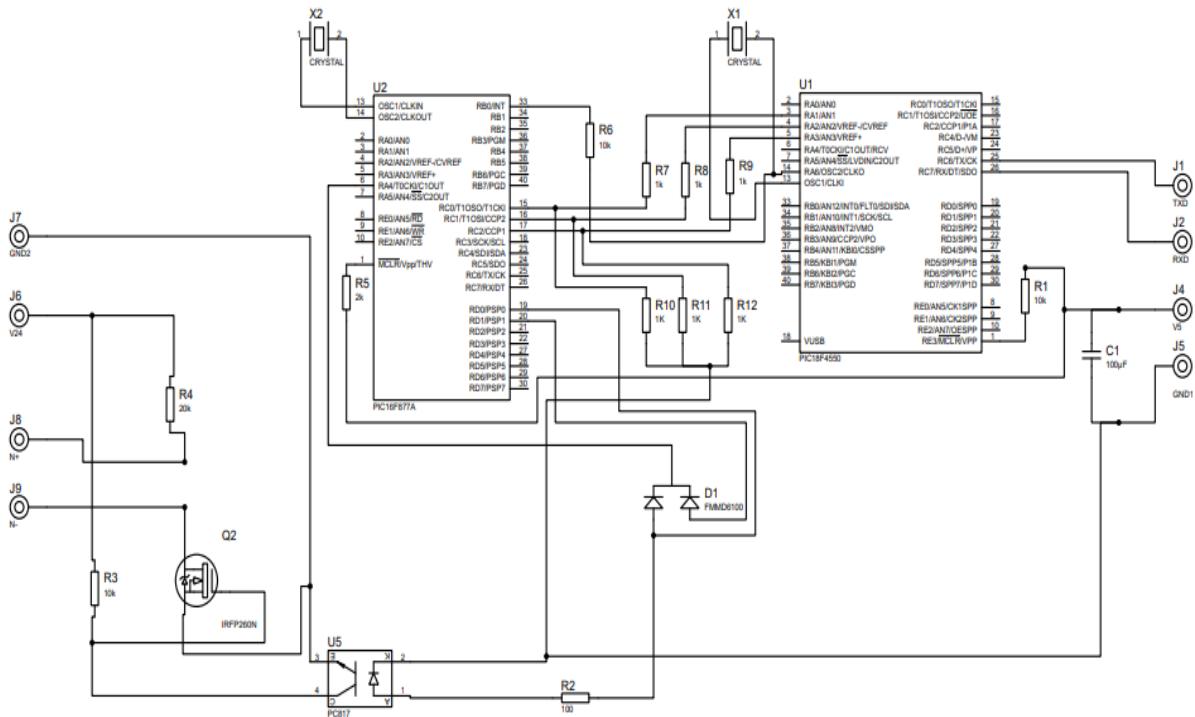


Figure II.12: Le circuit à microcontrôleur

5.2 Le circuit de contrôle l'injecteur solénoïde (électromagnétique)

Le schéma de circuit commande de commutateur à puissance unique est illustré à la figure II.13. La puissance motrice provient d'un seul VCC1. Le courant sur chaque bobine de l'électrovanne est contrôlé par un dispositif MOSFET de puissance, c'est pourquoi on l'appelle circuit à interrupteur unique à puissance unique.

Les avantages du circuit à commutateur unique d'alimentation unique sont d'avoir une structure simple et d'avoir une position commune pour les six signaux de commande, de sorte que seul un MOSFET [28]

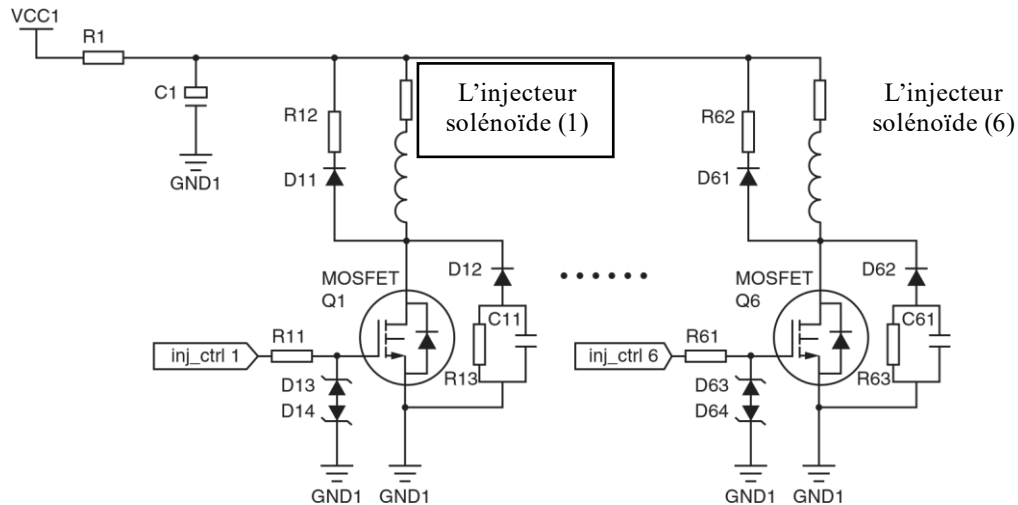


Figure II.13: Le schéma circuit de commande à interrupteur unique à puissance unique est illustré injecteur électromagnétique [28]

La fonction du circuit d'entraînement de puissance de l'électrovanne de l'injecteur est d'amplifier un signal de commande de courant faible de 5 V à un signal de courant fort pouvant piloter le solénoïde valve de l'injecteur. Afin de faire fonctionner l'injecteur normalement, le circuit d'entraînement de puissance de l'injecteur doit garantir que la forme d'onde du courant de sortie satisfait aux exigences. Exigences du courant d'entraînement de l'électrovanne de l'injecteur et que le courant change la réponse répond aux exigences spécifiées. L'entrée haute tension de la partie d'entraînement électrique est de 130 V et l'objet d'entraînement est la bobine de l'électrovanne de l'injecteur. La résistance interne de la bobine de l'électrovanne est 2,7 Ω , l'inductance est de 4,7 mH, le courant ouvert minimum est de 15 A et le minimum le courant de maintien est de 4 A. Conformément aux exigences ci-dessus, trois structures de circuit de commande différentes sont présentées : un circuit de commande à commutateur unique à puissance unique, un circuit de commande à commutateur double à puissance double, et un circuit de commande à double commutateur à puissance unique.

5.3 Le circuit de contrôle l'injecteur Piézo-électrique

Dans le cas des d'injecteur à piézoélectrique, les fabriquant proposent des circuits de contrôle typiques tels que illustrés par la figure 15. Pour le contrôle des injecteurs piézo, le processus comprend trois étapes : le chargement, l'entretien et déchargement comme montre la figure II.14. [28]

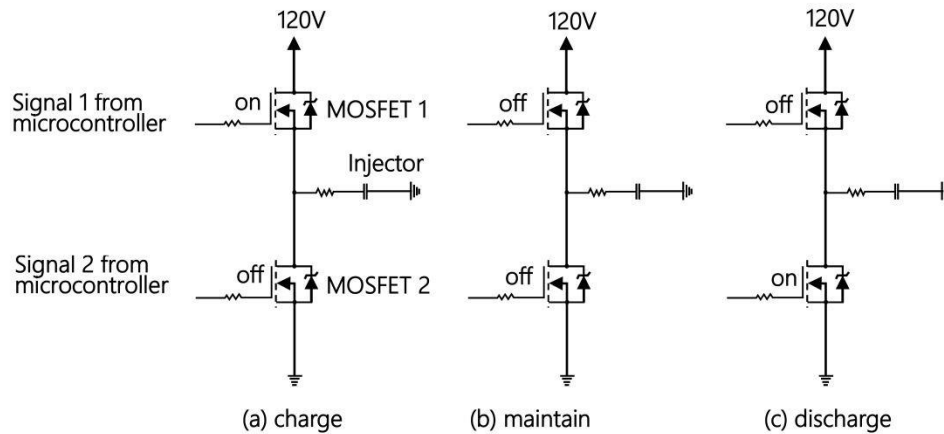


Figure II.14: Schéma schématique du circuit pilote de l'injecteur piézo : (a) charge, (b) maintenir et (c) l'état de déchargement [28]

Pendant la phase de charge, MOSFET1 est allumé et MOSFET2 est désactivé de sorte qu'une tension d'environ 120 V est fournie à l'injecteur. Le contrôle de commutation les signaux de MOSFET1 et MOSFET2 sont générés à partir de le CCP et les broches numériques d'un microcontrôleur.

Dans la phase de maintien, MOSFET1 et Les MOSFET2 sont éteints pour maintenir la conduite tension. Pendant l'étape de décharge, le MOSFET 1 est commuté éteint et MOSFET 2 est allumé pour décharger le courant

5.4 La communication

Le PC industriel est le cœur du système IHM. Il est responsable de l'exécution du logiciel HMI et de la communication avec l'unité de commande des injecteurs diesel.

RS232

Pour la communication, nous proposons d'utiliser le protocole RS232. C'est le protocole de base souvent utilisée. Il nécessite deux fils de communication Rx : réception et Tx : pour émission. Nous proposons le développement des fonctions suivantes :

Envp16 xy : Cette fonction assure l'envoi des paramètres de tests des injecteurs à savoir la fréquence et le temps d'activation.

Attp 16 : Lorsque le PIC16 envoie un signal, il est reçu par le PIC16 puis enregistré sous ARGG.

Return : nous avons (B,A) elle argument et instruction A et argument Le sien est spécial pour elle (B,A)

Tableau II.1: Fonctions et arguments de la communication

Instruction	Immediat	Stockage (holden)
XXX	Les informations stockées ne sont pas mises en œuvre in holden	ne fait rien
S00	ne fait rien	ne fait rien
Vxy	Valeur inverse=ARG=15=xy Return V(00F)	S00
Vxy	Valeur inverse=ARG=14=xy Return V(00E)	S00
PR2	PR2=Valeur%256 Return P(PR2)	S00
PWM	Return PWM	démarge PWM (ccp con = 0×3c T2 CON, B2=1)
PW0	Return PW0	Arrêter PW0 (CCP CON = 0×3o T2 CON, B2=0 / fORTC, B2 = 0)
Cxy	$ARG \leq 4 \times PR2 + 1$	

STI STC	$D\% = \text{ARG} / (4 \times \text{PR2} + 1) \times 100$ Return C(Dxy) else Return EEC ATTP16 si STI Envoyez ma commande au contrôleur PIC16 pour exécuter injecteur STC Prendre en compte le nombre d'impulsions INS=S00 Return INS	S00 excut PWM ordonner PIC16 a démarr la pulses injecteur Returnr INS (Cela signifie que l'injecteur pulse)
SPZ SSL	ATTP16 / Return SPZ ATTP16 / Return SSL	Ordonne PIC16 Activé S pièzo Ordonne PIC16 Activé S solénoïde
SNU	ATTP1A6 / nu= Valeur Return N(un)	Envoyer PIC16 nu ATTP16 si ARGG ≠ Valeur Return XXN
SDL	ATTP16 / dl=Valeur Return L (dl)	Envoyer PIC16 dl ATTP16 si ARGG ≠ Valeur Return XXL
SDU	ATTP16 mod=1000× Valeur+Valeur L rod=prm ×1000+pru si rod<mod Return EED Else dum=Valeur Duu=Valeur L Return D	Envoyer PIC16 dum = duty (ms) ATTP16 si ARGG ≠ Valeur Return XXD Envoyer PIC16 duu = duty (us) ATTP16 si ARGG ≠ Valeur Return XXd
SPR	ATTP16 SD4 Else drm=Valeur Dru=Valeur L	Envoyer PIC16 drm = Periode (ms) ATTP16 si ARGG ≠ Valeur Return XXF Envoyer PIC16 dru = Periode (us)

		ATTP16 si ARGG ≠ Valeur Return XXf
SST	F Valeur ≤ 1024 STput = Valeur Return S(STput)	S00
SKP	KP = Valeur Return SP(KP)	S00
SKD	KD = Valeur Return SD(KD)	S00
SKI	KI = Valeur Return SI(KI)	S00
RCC	Return C(CCPICON)	S00
RIN	Return I(INPUT)	S00
RDU	Return D(dum)	S00
RDU	Return d(duu)	S00
RDL	Return L(dl)	S00
RPR	Return P(prm)	S00
RPR	Return R(pru)	S00
RST	Return S(STput)	S00
RKP	Return KP(KP)	S00
RKD	Return KD(KD)	S00
RKI	Return KI(KI)	S00

5.4.1 Base de Données

Ces sociétés (Bosch, Delphi, Denso, Siemens) sont les principaux fabricants d'injecteurs. Ces injecteurs sont identifiés par des symboles et des codes propres à chaque injecteur. Les fabricants souvent proposent une fréquence de test ($F=16.6$ Hz) et une température pour le diesel ($T=40^{\circ}\text{C}$). Cependant le temps d'activation des injecteurs dépend du point de test. Après une recherche fastidieuse, nous avons pu récupérer des informations sur cinq point de test ainsi que la fourchette des résultats admissible (nje : débits d'injection ; ret : débit de retour). Dans les tableaux suivants, nous donnons des exemples sur les paramètres des tests et le résultat admissible pour les injecteurs solénoïdes des constructeurs : Bosch, Delphi, Denso. Aussi, nous donnons les paramètres et les résultats pour le cas d'injecteur piézo-électrique

Tableau II.2 : Extrait de la base de données de Bosch

Référence	0445110002	0445110008	0445110023
Test1	P= 1350 bar t= 800 μ s nje= 45.7 \pm 4.2cm ³ /1000H ret= 41 \pm 23cm ³ /1000H	P= 1350 bar t= 1000 μ s nje= 54.3 \pm 04cm ³ /1000H ret= 42 \pm 24cm ³ /1000H	P= 1600bar t= 820 μ s nje= 61 \pm 04cm ³ /1000H ret= 39 \pm 21cm ³ /1000H
Test2	P= 800 par t= 500 μ s nje= 17.9 \pm 03cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H	P= 800 par t= 500 μ s nje= 18 \pm 2.5cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H	P= 800 par t= 590 μ s nje= 18.5 \pm 3.5cm ³ /1000H ret= 41 \pm 23cm ³ /1000H
Test3	P= 250par t= 550 μ s nje= 2.8 \pm 02cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H	P= 250 par t= 600 μ s nje= 3.4 \pm 4.1cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H	P= 1350 par t= 800 μ s nje= 45.7 \pm 4.2cm ³ /1000H ret= 41 \pm 23cm ³ /1000H
Test4	P= 800 par t= 160 μ s nje= 2.1 \pm 1.3cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H	P= 800 par t= 160 μ s nje= 1.9 \pm 1.3cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H	P= 250 par t= 810 μ s nje= 5.3 \pm 2.5cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H
Test5	P= 1350 par t= 000 μ s nje= 00 \pm 00cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H	P= 1350 par t= 000 μ s nje= 00 \pm 00cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H	P= 1350 par t= 000 μ s nje= 00 \pm 00cm ³ /1000H ret= 00 \pm 00cm ³ /1000H

Ainsi, dans le premier test, il faut assurer une pression de diesel de 1350 bar, et un temps d'activation de 800 micros secondes avec une fréquence de 16.6Hz. Si l'injecteur est en bon état (sans défaut), la quantité injectée doit être dans de la plage nje= 45.7 \pm 4.2cm³ et la quantité de retour dans la plage ret= 41 \pm 23cm³ pour 1000 coups.

Pour **Delphi** : températures (T= 40°C) et les fréquences (F=16.6Hz)

Tableau II.3: Extrait de la base de données de Delphi

Référence	00002D-MB E-Sprinter	00201D-Hyu-I20-Ix20	00401Z-Ford
Test1	P= 1200 bar t= 1600 μ s nje= 82 \pm 5.5cm ³ /1000H ret= 30 \pm 15cm ³ /1000H	P= 1350 bar t= 770 μ s nje= 44 \pm 03cm ³ /1000H ret= 30 \pm 35cm ³ /1000H	P= 1200bar t= 1500 μ s nje= 64.5 \pm 04cm ³ /1000H ret= 35 \pm 20cm ³ /1000H

Test2	P= 1200 bar t= 1000 μ s nje= $57 \pm 03 \text{cm}^3/5\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 800 bar t= 800 μ s nje= $34 \pm 03 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 1200 bar t= 1000 μ s nje= $45.5 \pm 3.5 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$
Test3	P= 1200bar t= 600 μ s nje= $33.7 \pm 4.7 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 300 bar t= 600 μ s nje= $7.9 \pm 1.5 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 1200 bar t= 300 μ s nje= $16.5 \pm 02 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$
Test4	P= 640 bar t= 350 μ s nje= $5.8 \pm 1.5 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 400 bar t= 300 μ s nje= $2.2 \pm 01 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 500 bar t= 230 μ s nje= $3.5 \pm 02 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$
Test5	P= 0000 bar t= 0000 μ s nje= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 0000bar t= 0000 μ s nje= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 230 bar t= 600 μ s nje= $4.6 \pm 02 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$

Pour **Denso** : températures (T= 40°C) et les fréquences (F=16.6Hz)

Tableau II.4: Extrait de la base de données de Denso

Référence	00-6366 Isusu Turkuaz	00-6367 Isusu	095000-041# (toyota)
Test1	P= 1440 bar t= 800 μ s nje= $66 \pm 3.6 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $48 \pm 20 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 1440 bar t= 800 μ s nje= $66 \pm 03 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $48 \pm 20 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 1200bar t= 2000 μ s nje= $107.4 \pm 3.6 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $75.6 \pm 15.1 \text{cm}^3/1000\text{H}$
Test2	P= 800 bar t= 500 μ s nje= $13.5 \pm 03 \text{cm}^3/5\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 800 bar t= 500 μ s nje= $13.5 \pm 03 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 800 bar t= 1000 μ s nje= $49.8 \pm 1.8 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $33.8 \pm 6.8 \text{cm}^3/1000\text{H}$
Test3	P= 250bar t= 550 μ s nje= $01 \pm 0.4 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 250 bar t= 550 μ s nje= $01 \pm 0.4 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 640 bar t= 600 μ s nje= $19 \pm 1.1 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $20.7 \pm 4.1 \text{cm}^3/1000\text{H}$
Test4	P= 80 bar t= 280 μ s nje= $2.9 \pm 2 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 80 bar t= 280 μ s nje= $2.9 \pm 02 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 250 bar t= 800 μ s nje= $9.3 \pm 1.3 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$
Test5	P= 300 bar t= 600 μ s nje= $2.7 \pm 0.5 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 300 bar t= 600 μ s nje= $2.7 \pm 0.5 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 800 bar t= 400 μ s nje= $3.4 \pm 0.9 \text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00 \pm 00 \text{cm}^3/1000\text{H}$

- **Pièzo** : températures ($T= 40^{\circ}\text{C}$) et les fréquences ($F=16.6\text{Hz}$)

Tableau II.5: Pièzo

Référence	0445115003	0445116039	T-BK2Q9K546AG-200
Test1	P= 300 bar t= 2500 μs nje= $65\pm 35\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 1800 bar t= 550 μs nje= $47.8\pm 4.5\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $12\pm 04\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 1500bar t= 800 μs nje= $49.6\pm 2.4\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $33.9\pm 10\text{cm}^3/1000\text{H}$
Test2	P= 800 bar t= 455 μs nje= $19.6\pm 4.3\text{cm}^3/5\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 1200 bar t= 180 μs nje= $2.2\pm 1.3\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 800 bar t= 520 μs nje= $24.1\pm 2.4\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$
Test3	P= 1600 bar t= 535 μs nje= $50.1\pm 5.5\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $11\pm 04\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 250 par t= 615 μs nje= $4.3\pm 2.2\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 250 bar t= 560 μs nje= $7.2\pm 2.4\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$
Test4	P= 1200 bar t= 150 μs nje= $2.1\pm 1.5\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 800 bar t= 485 μs nje= $17.9\pm 3.6\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 900 bar t= 220 μs nje= $4.5\pm 1\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$
Test5	P= 250 bar t= 535 μs nje= $4.3\pm 2.7\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 0000 bar t= 0000 μs nje= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$	P= 250 bar t= 200 μs nje= $0.9\pm 0.3\text{cm}^3/1000\text{H}$ ret= $00\pm 00\text{cm}^3/1000\text{H}$

6. Conclusion

Dans ce commande à base de microcontrôleurs pour appliquer les tests standards de diagnostic des injecteurs.

La carte électronique proposée reste standard est se base sur l'utilisation des MOSFET. Ces derniers nous assurerons une rapidité de commutation sans échauffement afin de répondre à des temps d'activation de l'ordre de millisecondes. Le programme élaboré assure une communication entre les PIC et permet de transmettre les paramètres de test.

Dans le chapitre suivant, nous allons partie réalisation de la carte et du programme des PIC ainsi que les résultats du test.

Chapitre III:

Réalisation Et Résultats

1. Introduction

Dans ce dernier chapitre nous allons examiner la réalisation de la du système de contrôle et de commande des injecteurs. Ce système basé sur des microcontrôleurs, constituera une première phase dans la conception et réalisation future d'un banc d'essai des injecteurs.

Ainsi, nous allons présenter une carte électronique qui assurera l'application des différents tests standards d'un injecteur diesel de type solénoïde. Aussi, nous allons examiner l'environnement de programmation des microcontrôleurs. A la fin, nous allons présenter les résultats de test obtenu.

2. Conception du circuit et de la carte électronique

Afin de créer un circuit électrique intégré pour le système d'injection via l'application Proteus, vous devez suivre les étapes suivantes :

2.1 Conception du circuit électronique

a. Circuit alimentation :

Il s'agit d'un contrôleur 220V AC converti en 4.5V DC pour alimenter le circuit de commande électronique. L'une de ses caractéristiques est de contrôler l'intensité de courant continu résultant en s'appuyant sur le circuit électronique jusqu'à sa mise sous tension Comme montre la figure III.1.



Figure III.1: Circuit alimentation

b. Circuit de communication :

Le module convertisseur USB/RS232, c'est l'unité de communication et de transfert de données entre l'ordinateur et carte électronique via une liaison entre (TXD et RXD de RS232) vers pin (RC6/TX/CK et RC7/RX/DT/ SDO pour le microcontrôleurs PIC18F4550), Comme montre la figure III.2. Dans le PC, nous utilisons l'environnement système de micro chip.



Figure III.2: Circuit de communication

c. Circuit de traitement des données

La PIC18F4550 reçoit les données, les exécute, puis renvoie les données au PC. La commande de l'expéditeur est exécutée depuis l'ordinateur et ces données sont transmises via RS232. Les données sont également envoyées au PIC16 afin d'effectuer la tâche de répartiteur. PIC18F4550 et PIC16 sont connectés via le PIN (3,4,5) du PIC18F4550 puis connectés à trois résistances dont chacune est connectée au PIC16 au PIN (15,16,17).

La PIC16F877A reçoit les données envoyées du PIC18F4550 afin de mettre en œuvre ou de faire fonctionner l'injecteur solénoïde en envoyant un signal du code PIN (19,20) du PIC16F887A à l'optocoupleur.

Le résonateur Crystal est un pilote d'impulsions pour créer le signal horloge de fonctionnement pour PIC18F4550 et PIC16F887A, comme montre la figure III.3.

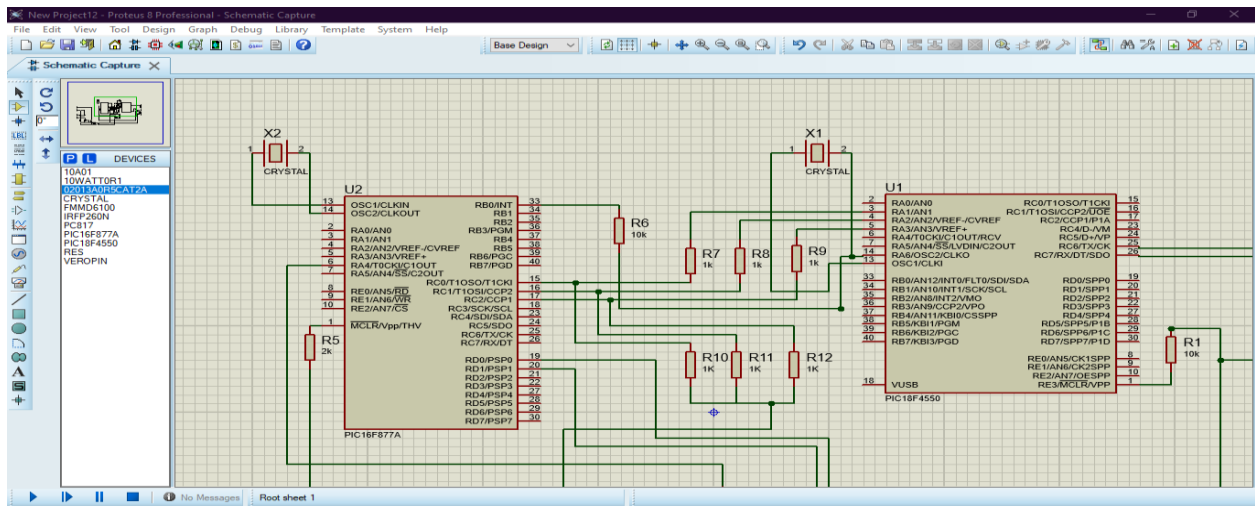
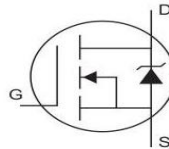
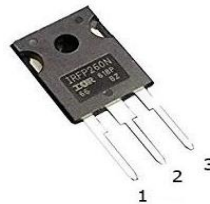


Figure III.3: Circuit de traitement des données

d. Circuit de commande des injecteurs [29]

Le circuit de contrôle mosfet a trois broches :

- PIN (1) Geta
- PIN (2) Dreno
- PIN (3) Source
- Courant 50 A
- Tension 200 V
- Fréquence 1.0 MHz



$V_{DSS} = 200V$
$R_{DS(on)} = 0.04\Omega$
$I_D = 50A$

L'injecteur solénoïde 24 V est connecté à l'entrée N+ et GND est connecté au MOSFET à l'entrée D. L'optocoupleur connecte l'injecteur solénoïde à GND chaque fois qu'il effectue une opération de conducteur, où le microcontrôleur PIC16F877 contrôle l'optocoupleur avec 5 V comme montre la figure III.4.

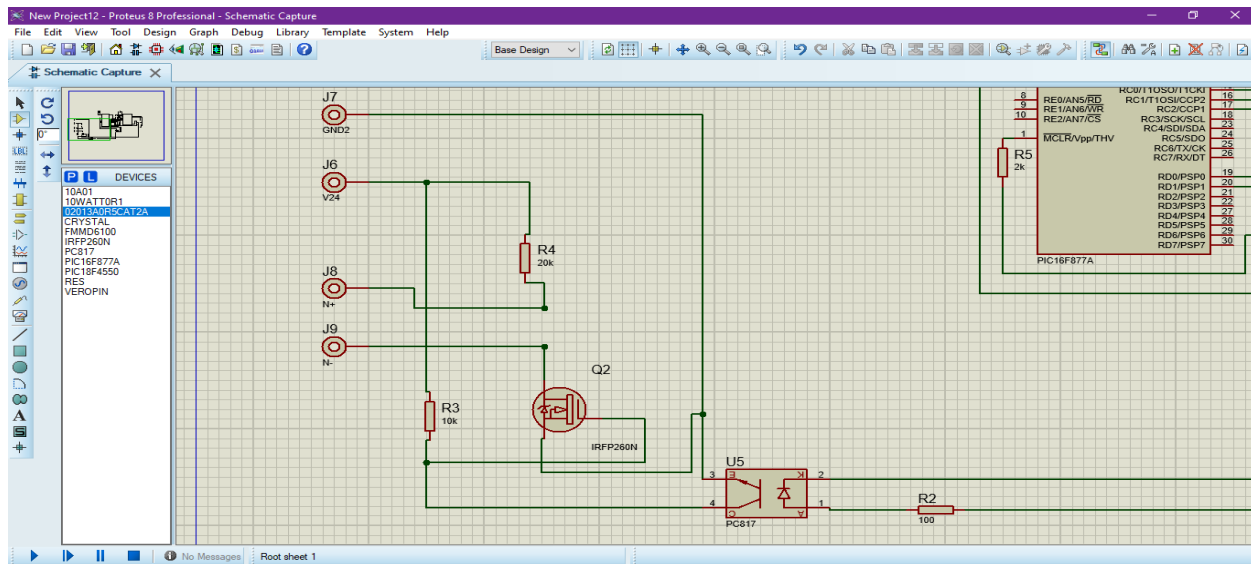


Figure III.4: Circuit de commande des injecteurs

2.2 Réalisation de la carte électronique

Pour réaliser notre carte, nous allons suivre les étapes suivantes :

1. Installez l'application Proteus 8 Professional
2. Cliquez sur le menu Fichier
3. Ouvrir un nouveau Fichier

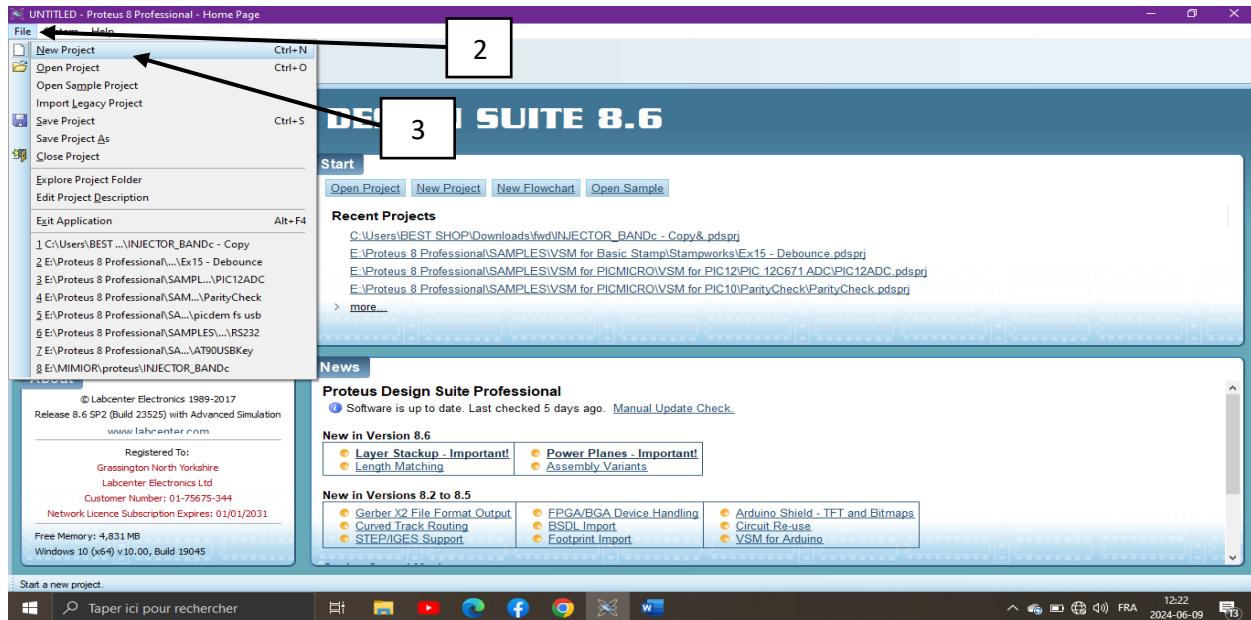


Figure III.5: Création de nouveau projet dans Proteus

4. Nouveau pour nommer le projet

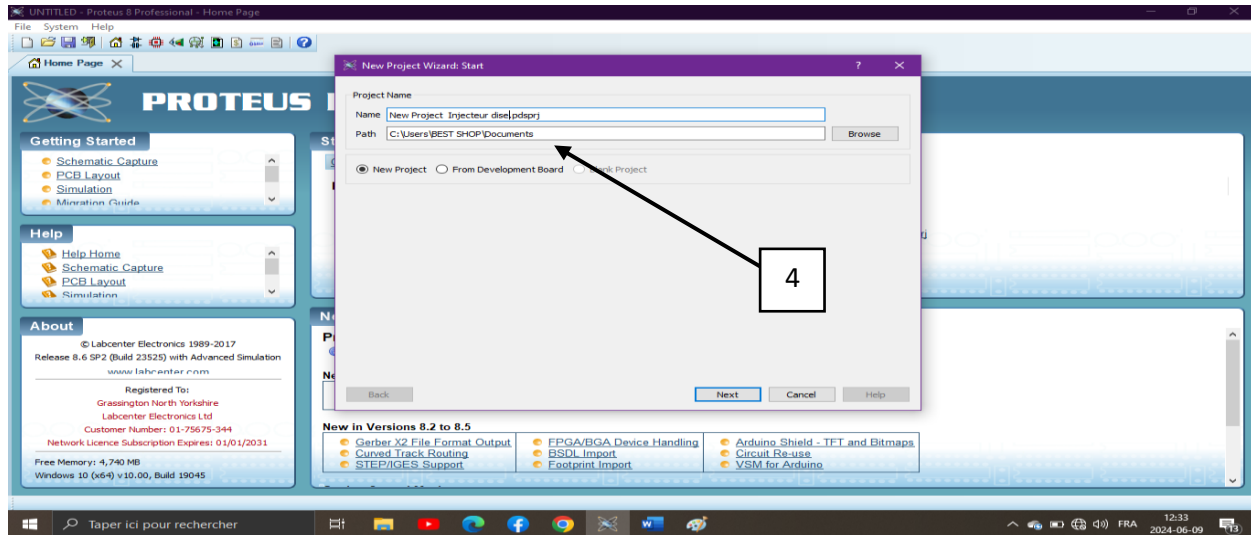


Figure III.6: Dénomination du nouveau projet

A. Composant

Le circuit électrique est constitué d'un groupe d'unités électroniques qu'il faut insérer :

- PIC18 - PIC16 - Résistances
- MPXA6115A6U - IRFP260N - Capacités
- CRYSTAL - BEC INJECTOR

Comme montre la figure III.7.

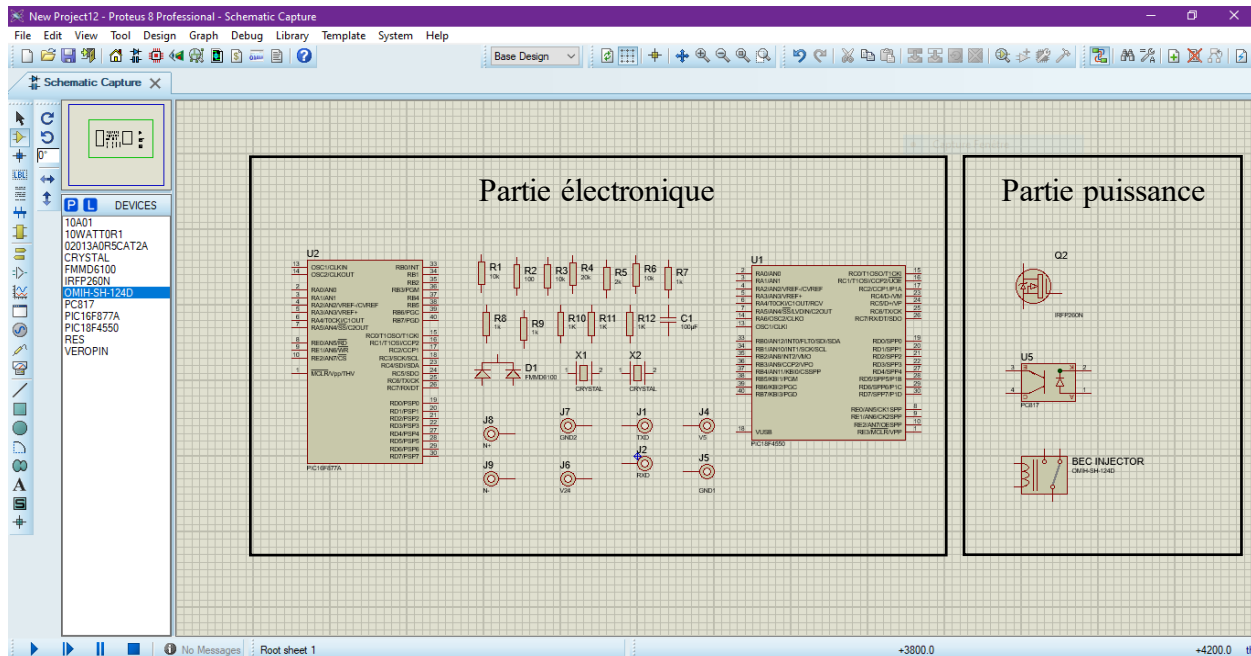


Figure III.7: Composant circuit électrique

B. Circuit Complet de composants

Le schéma global obtenu après connexion des pins est illustré par la figure III.8.

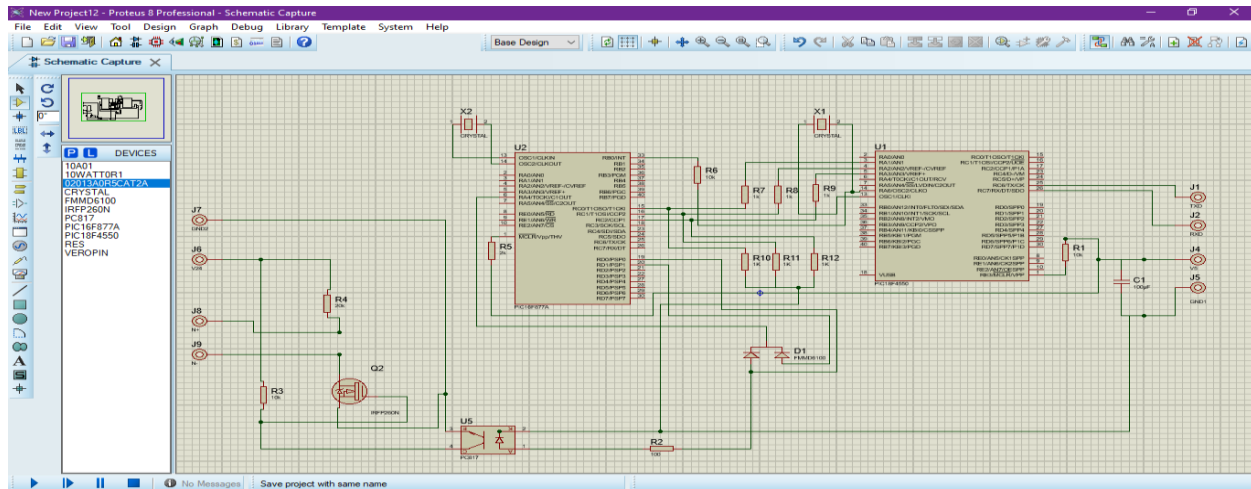


Figure III.8: Circuit Complet de composants

3. Programmation interface de programme

Objectif de la programmation : la logique de test est programmé dans le mémoire flash des PIC. Nous avons choisi l'utilisation de l'environnement mikroC.

Les microcontrôleurs PIC18 et PIC16 de Microchip sont programmés à l'aide de mikroC PRO pour PIC et le langage de programmation est C.

3.1 Interface de programme

A. Cliquez sur le menu Fichier, comme montre la figure III.11. suivante.

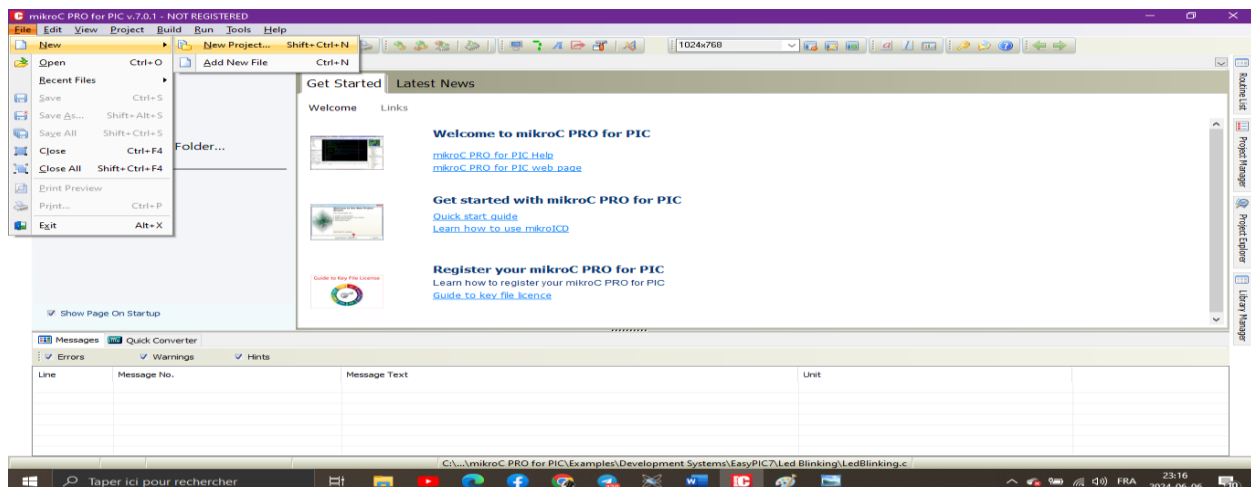


Figure III.11: Comment ouvrir un nouveau fichier dans mikroC PRO for PIC

B. Name Project ((MY_PIC18_INJECTOR)) PIC18F4550, comme montre la figure III.12. suivante.

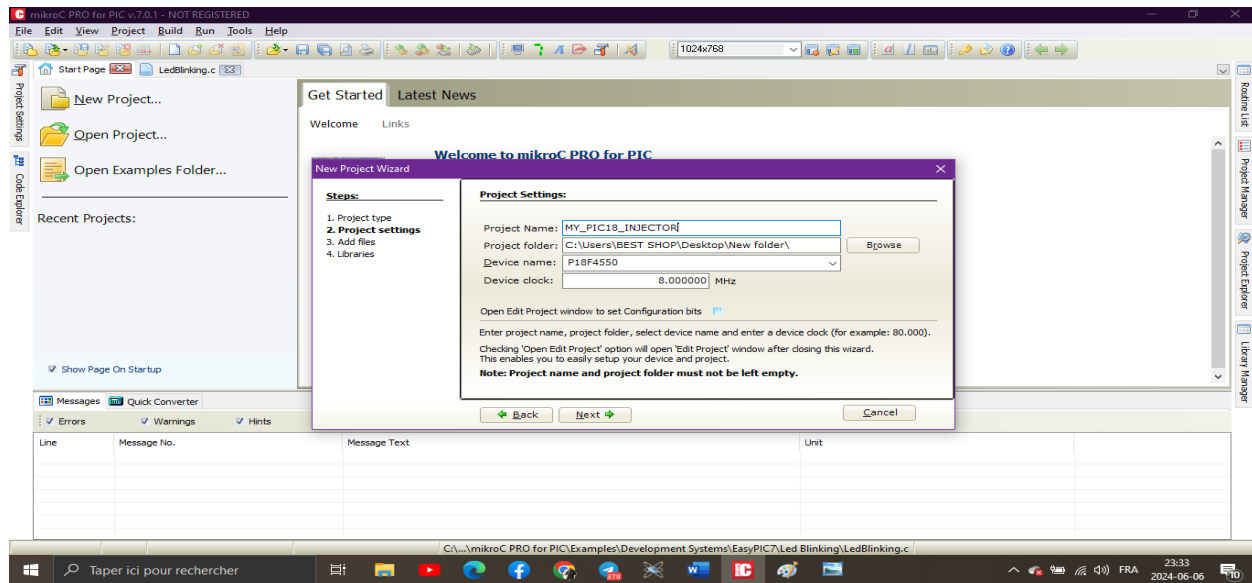


Figure III.12: MY_PIC18_INJECTOR

C. Name Project ((MY_PIC16_INJECTOR)) PIC16F874A/877, comme montre la figure III.13. suivante.

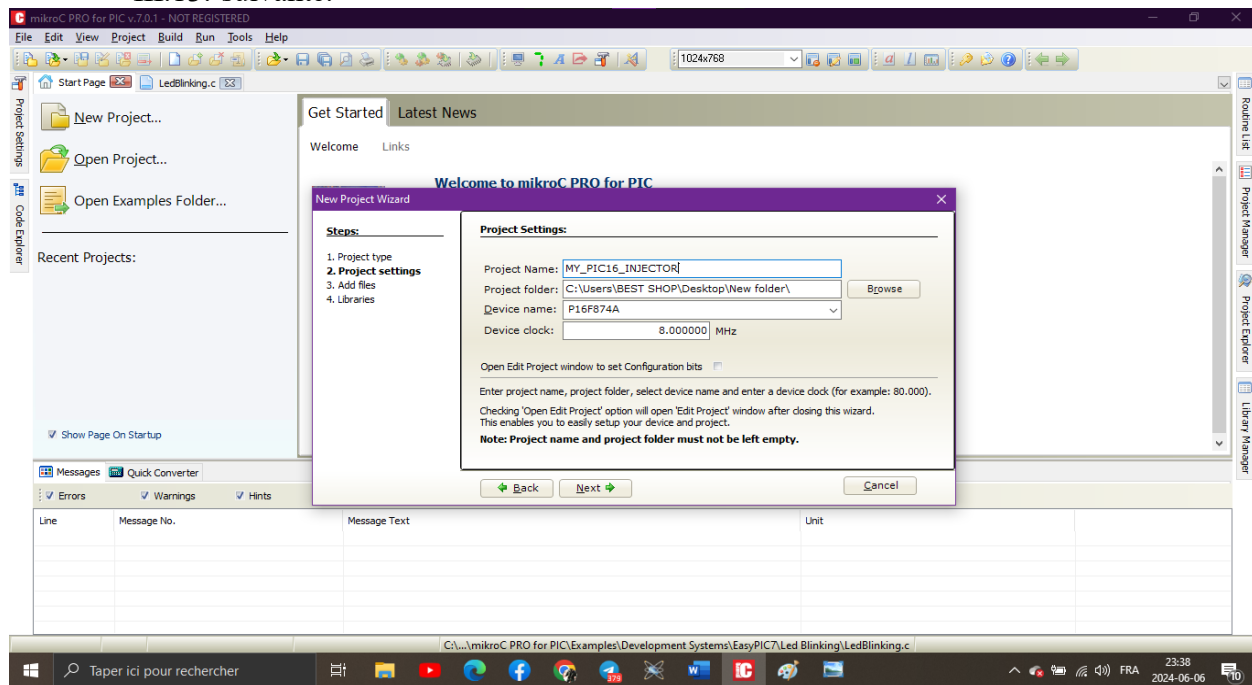


Figure III.13: le Projet MY_PIC16_INJECTOR

3.2 Ecrire programme

Cette partie du code de programmation (C) pour PIC 18 et PIC16 est représentée comme indiqué dans l'image suivante.

```

extern void receive_WORD ();extern void sand_WORD(char a,int b) ; extern void SYSTEM_INIT () ;
extern void INS_virif(); extern void EXCUTION() ;
char k;
extern void RECEIVE_BYTE(); extern void snd_PACKET() ; extern void rec_PACKET(); extern void SAND_BYTE(char byte); extern char BYTE;

10 void set_defaults () {
    TRISD=0;
    TRISB=0;
    PRESCAL=0;
    TRISC1_bit=0; //ccp2 pin
    PR2=0xFF; //200
    T2CON=0x1;
    CCP2CON=0x0;
    CCP1CON=0x3c;
    SYSTEM_INIT ();
20 TRISC.b1=0; //ccp2 pin
    CCP2L =0;CCP1L =64;
    TRISA1_bit=0;TRISA2_bit=1; TRISA3_bit=0; TRISA5_bit=0;
    TRISA0_bit=1;//analog output
24 ADCON1=0x0e;//set PORTA.B1 ANALOG INPUT
}

```

Figure III.14: Explique la partie de la programmation

3.3 Compilation

Exécuter de Programme, comme montre la figure III.15. suivante.

```

extern void RECEIVE_BYTE() ;
extern void como_pic16();
extern void receive_WORD () ;extern void sand_WORD(char a,int b) ; extern void SYSTEM_INIT () ;
extern void INS_virif(); extern void EXCUTION() ;
char k;
extern void RECEIVE_BYTE(); extern void snd_PACKET() ; extern void rec_PACKET(); extern void SAND_BYTE(char byte); extern char BYTE;

10 void set_defaults () {
    TRISD=0;
    TRISB=0;
    PRESCAL=0;
    TRISC1_bit=0; //ccp2 pin
    PR2=0xFF; //200
    T2CON=0x0;
    CCP2CON=0x0;
    CCP1CON=0x3c;
    SYSTEM_INIT ();
20 TRISC.b1=0; //ccp2 pin
    CCP2L =0;CCP1L =64;
    TRISA1_bit=0;TRISA2_bit=1; TRISA3_bit=0; TRISA5_bit=0;
    TRISA0_bit=1;//analog output
    ADCON1=0x0e;//set PORTA.B1 ANALOG INPUT
    ADCON2=0x92;//set tad and v reef on vdd vss
    ADCON0=0x1 ; //switch on ADC
    while (ADCON0.B1 ==1) ;/*clear ADREG*/
}

```

Mis en œuvre avec succès

Finished successfully: 10 Jun 2024, 19:10:53

Figure III.15: Mise en œuvre de la programmation

3.4 Chargement Programme

❖ microcontrôleur PIC18F4550 :

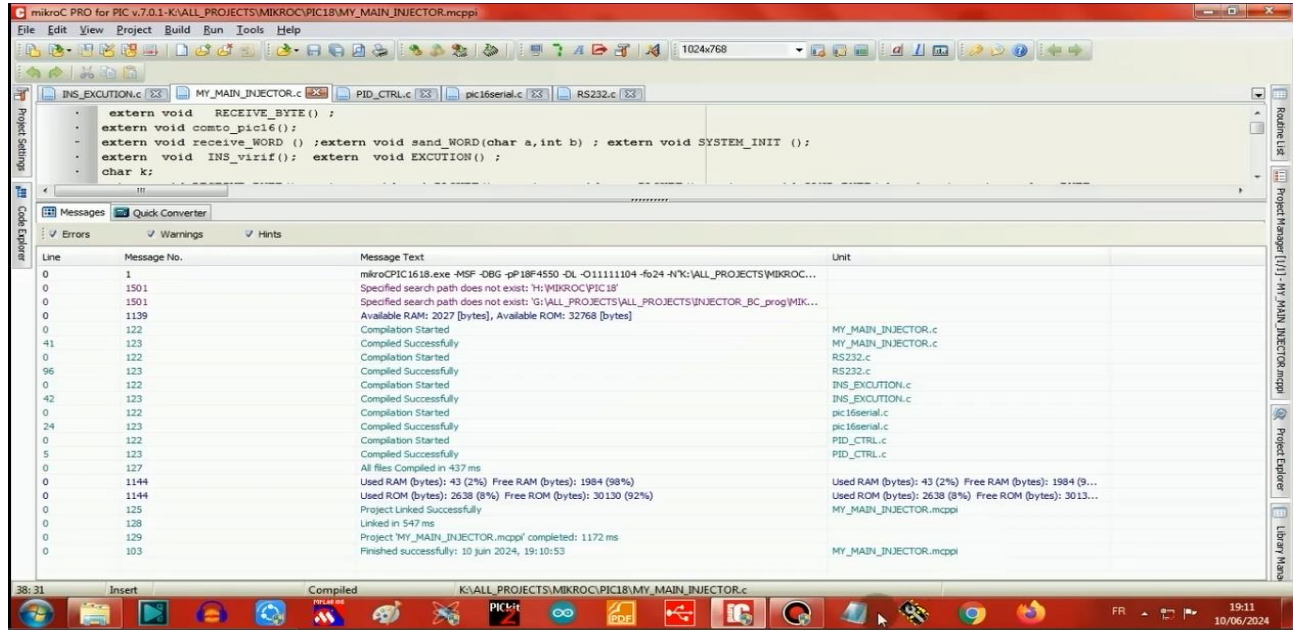


Figure III.16: Charger la programmation dans PIC18

❖ microcontrôleurs PIC16F874A/77A :

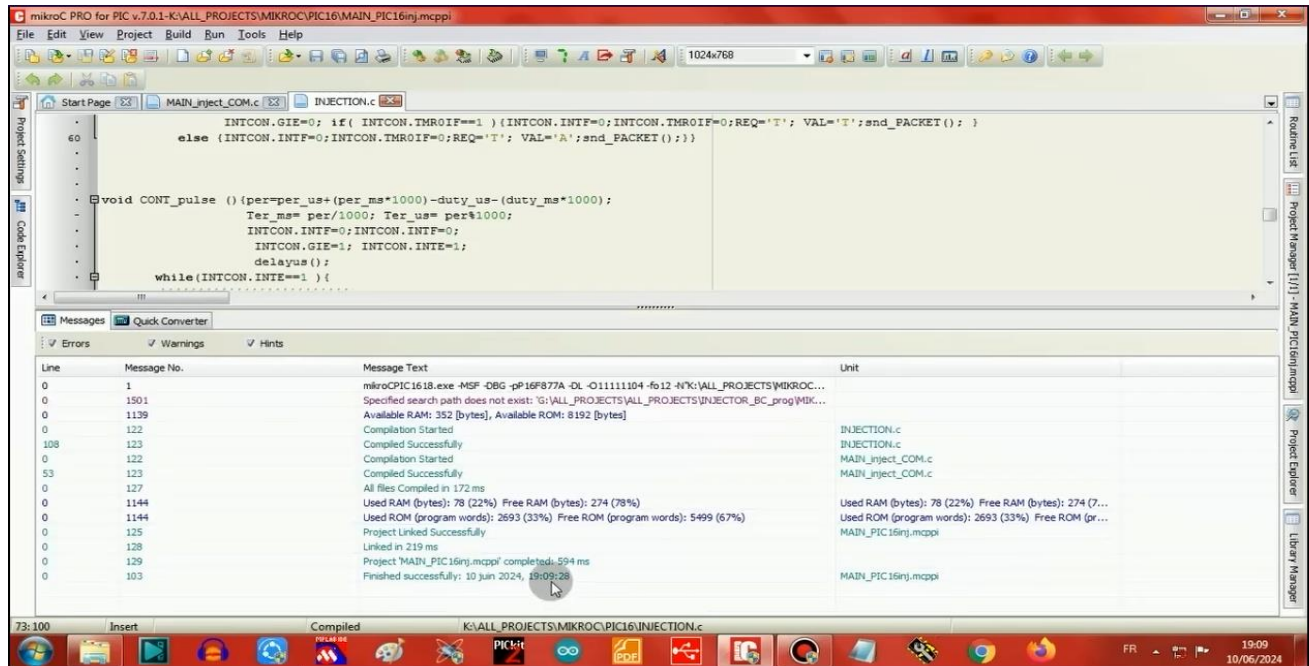


Figure III.17: Chargement du programme dans PIC16

4. Test et Résultats

Dans cette section, nous allons élaborer des tests sur la carte électronique développée. Pour cela, nous avons réalisé le montage de la figure III.18.

4.1 Les composants de l'expérimentation

La plate-forme de test des injecteurs a été créée composée d'un ordinateur, d'une carte électronique et Convertisseur électrique AC/DC et oscilloscope numérique hantek et d'un injecteur solénoïde, comme montre la figure III.18. suivante.

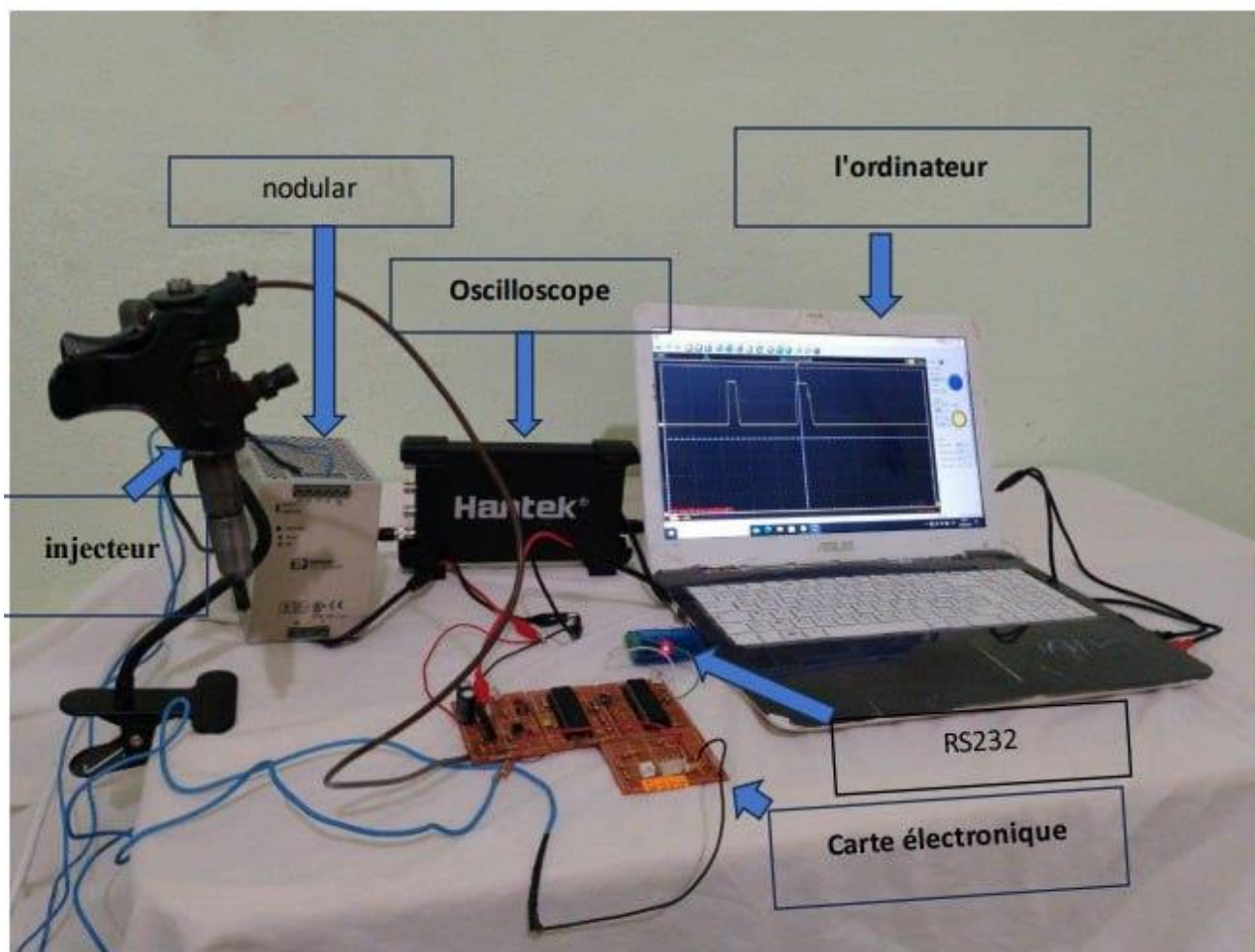


Figure III.18: Composantes du projet terminé

4.2 Résultat de test :

L'injecteur à vis a été testé dans trois tests différents. Dans chaque test, nous réduisons la durée d'ouverture et maintenons la même fréquence dans tous les tests.

4.2.1 Test 01 :

- Fréquence fixe 16,6 MHz
- Tension 24 V
- Durée d'ouverture de l'injecteur solénoïde 800 μ s
- Lorsque l'application a une tension nominale de 24 V, l'injecteur solénoïde fonctionne pendant 800 μ s puis s'arrête, comme montre la figure 16 suivante.

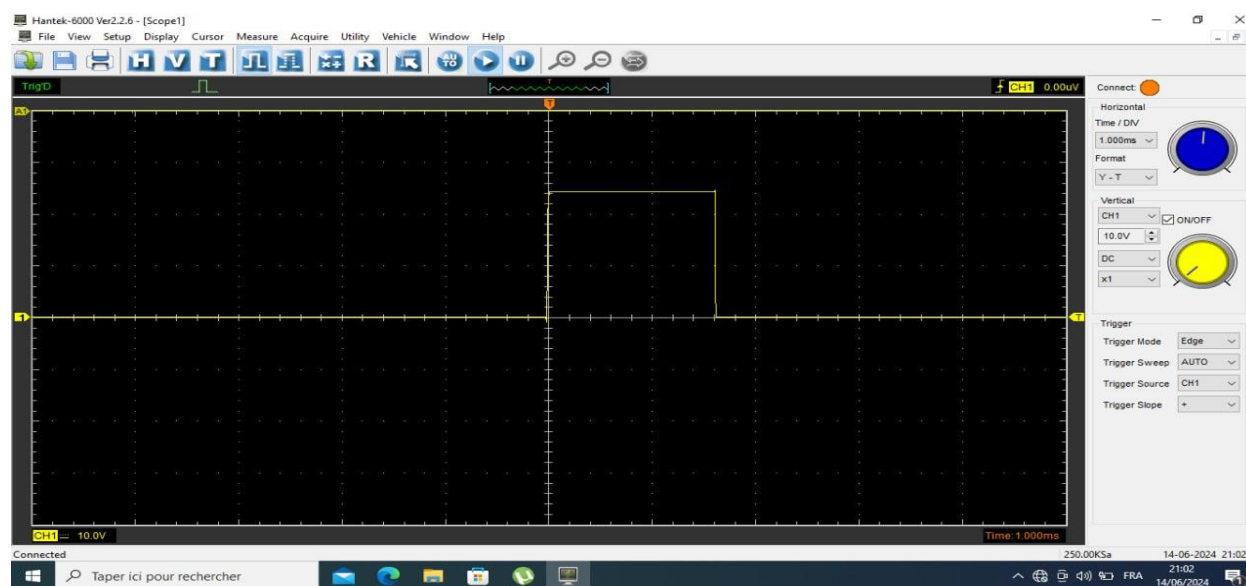


Figure III.19: La tension est appliquée à l'injecteur solénoïde pendant 800 μ s

4.2.2 Test 02 :

- Fréquence fixe 16,6 MHz
- Tension 24 V
- Durée d'ouverture de l'injecteur solénoïde 500 μ s
- Lorsque l'application a une tension nominale de 24 V, l'injecteur solénoïde fonctionne pendant 500 μ s puis s'arrête, comme montre la figure 20 suivante.

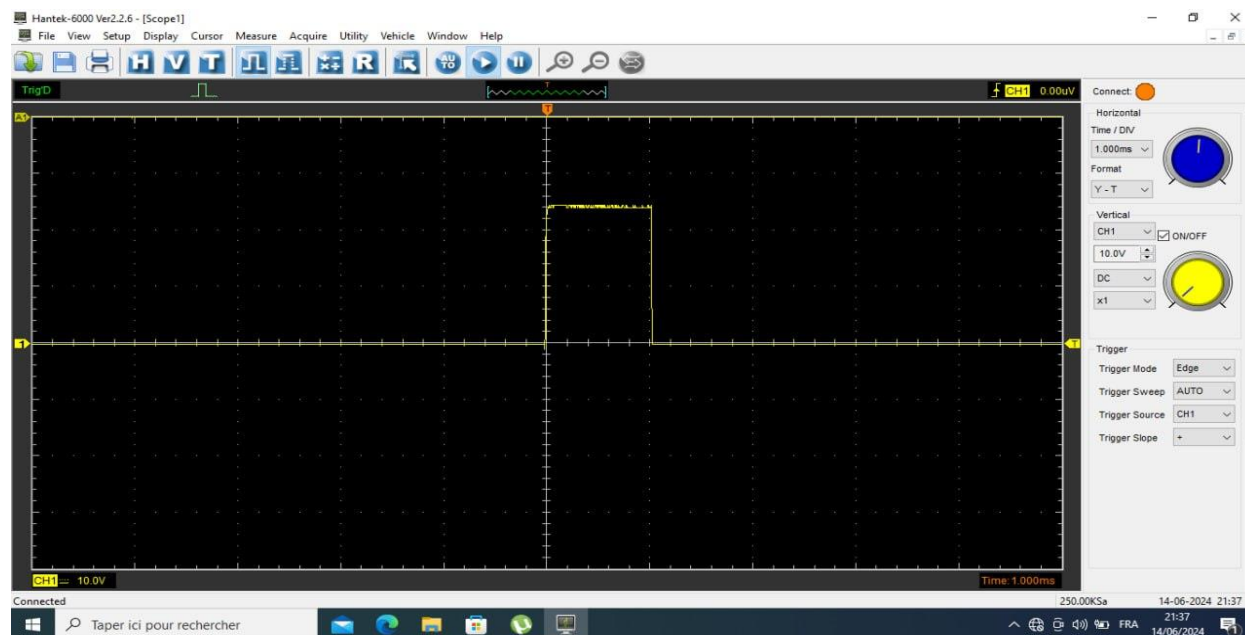


Figure III.20: La tension est appliquée à l'injecteur solénoïde pendant 500 µs

4.2.3 Test 03 :

- Fréquence fixe 16,6 MHz
- Tension 24 V
- Durée d'ouverture de l'injecteur solénoïde 550 µs
- Lorsque l'application a une tension nominale de 24 V, l'injecteur solénoïde fonctionne pendant 550 µs puis s'arrête, comme montre la figure 21 suivante.

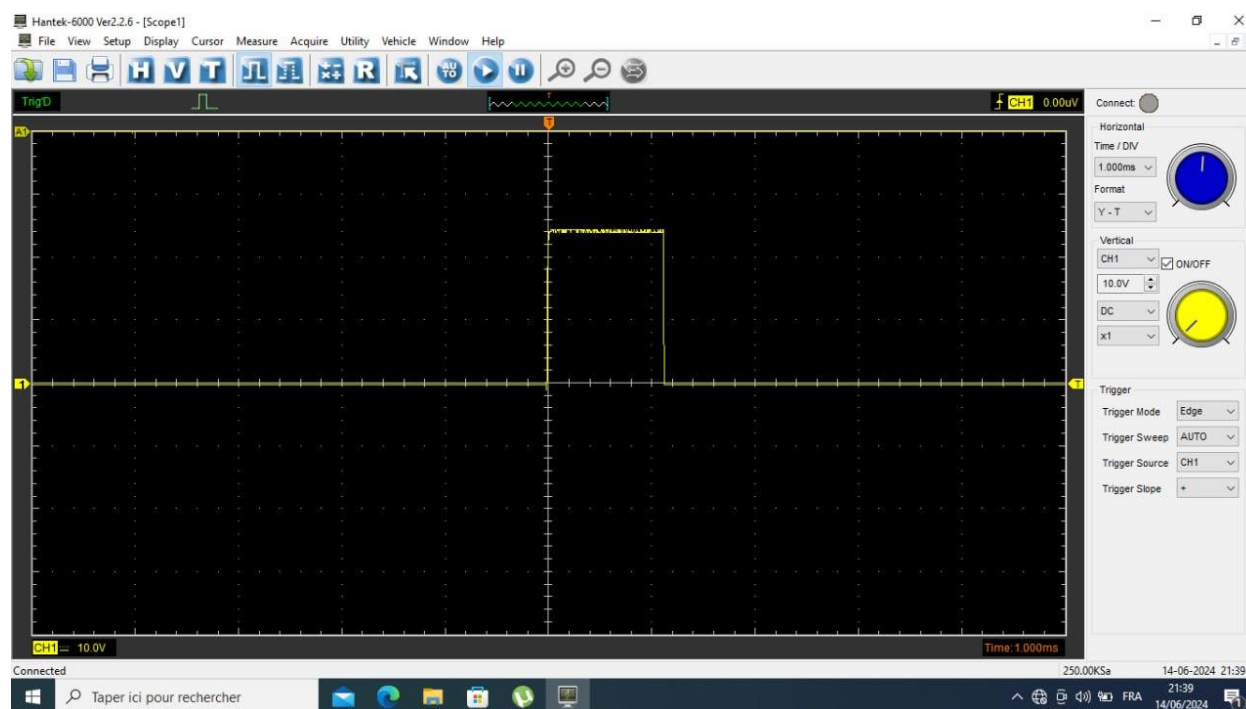


Figure III.21: La tension est appliquée à l'injecteur solénoïde pendant 550 μ s

4.2.4 Test 04 :

- Fréquence fixe 16,6 MHz
- Tension 24 V
- Durée d'ouverture de l'injecteur solénoïde 160 μ s
- Lorsque l'application a une tension nominale de 24 V, l'injecteur solénoïde fonctionne pendant 160 μ s puis s'arrête, comme montre la figure 22 suivante.

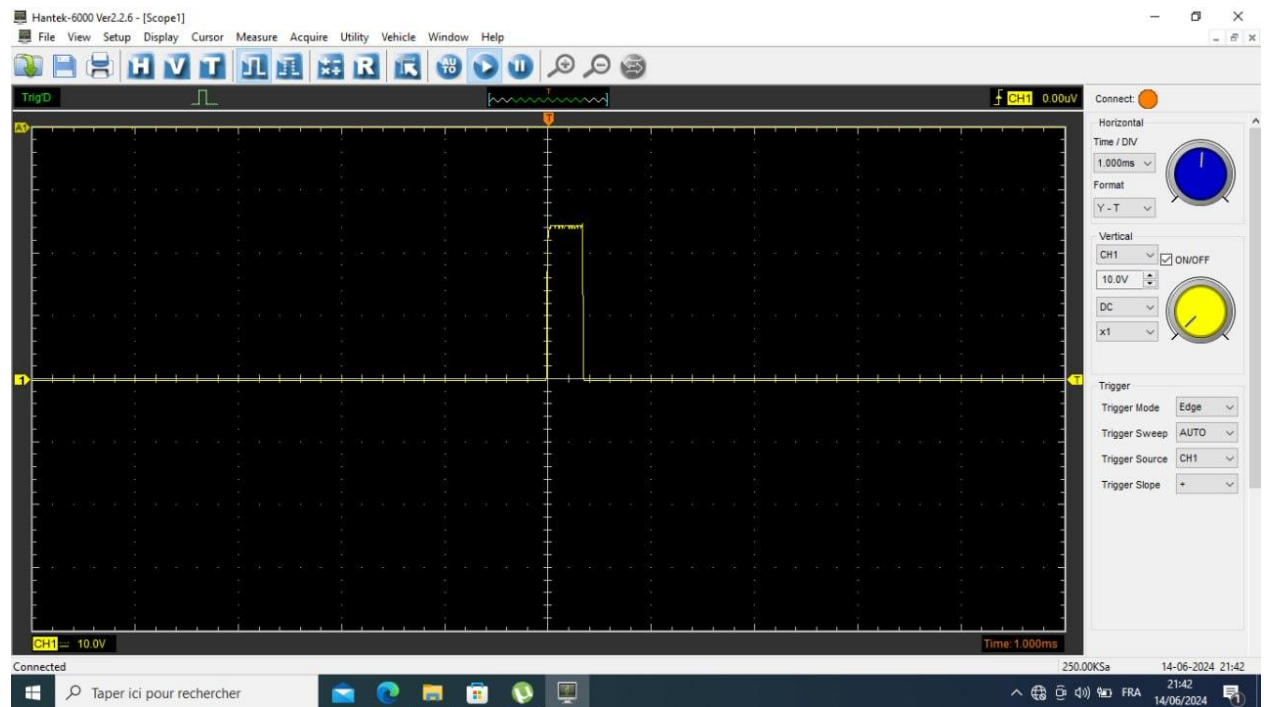


Figure III.22: La tension est appliquée à l'injecteur solénoïde pendant 160 μ s

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la réalisation de la carte ainsi que le chargement du programme. Nous avons proposé un montage pratique permettant de tester la solution développée.

Le montage nous a permis d'appliquer quatre tests sur un injecteur de type solénoïde. Les résultats montrent que le circuit de contrôle et de puissance arrive à appliquer les paramètres de test selon la recommandation des constructeurs.

Conclusion Générale

Dans notre étude, nous avons étudié et réalisé un système électronique de contrôle d'injecteurs diesels.

Nous avons examiné les différentes terminologies et notions liés à l'injection et les standards de test recommandés par les constructeurs tels que les entreprises Bosch, Denso, Siemens. Quatre points de test au minimum sont proposés afin d'examiner les injecteurs le long du profil d'exploitation en partant du régime ralenti jusqu'au plein régime.

A la suite, nous avons présenté les injecteurs de types solénoïdes et pièze. La différence dans le principe de fonctionnement, nous a conduits à présenter différemment l'allure des courants de contrôle et ainsi le circuit électronique de commande approprié.

Un temps importants était nécessaire pour rassembler une base de données qui contient les paramètres de test d'un grand nombre des injecteurs solénoïdes et pièze.

Nous avons élaboré un circuit de contrôle à base de microcontrôleurs PIC18F4550 et PIC16F778 afin d'assurer une lecture des paramètres de la base de donnée et d'effectuer le test convenablement. Le circuit de puissance est à base de transistor de type mosfet. Le rapport cyclique ouverture/fermeture et la vitesse de réponse des injecteurs sont contrôlés à l'aide de mosfet dont la référence est extraite de la base de données.

Dans le dernier chapitre, nous avons proposé un montage de test des injecteurs solénoïdes. La carte électronique développée a assuré l'application des impulsions de temps très court selon les paramètres du constructeurs de l'injecteur sous-test.

Les résultats obtenus sont encourageants dès qu'elles permettent d'appliquer les paramètres de test selon le type de l'injecteur.

Dans le but de compléter ce travail, nous proposons dans une prochaine étape de réaliser le circuit de contrôle des injecteurs pièze ainsi qu'une interface HMI liée à la base de données qu'on a rassemblée.

Références

- [1] yuxuf Li, Shijie An, 2019, Technologie d'injection de carburant à rampe commune dans les moteurs diesel, <https://www.wiley.com/en-gb/Common+Rail+Fuel+Injection+Technology+in+Diesel+Engines-p-9781119107231>.
- [2] Biodieselmanual , (2010), <https://www.slideshare.net/slideshow/biodieselmanual/3713884>.
- [3] Bosch-Hdi-Edc15c2-Injection-System.doc, (2023), <https://fr.slideshare.net/slideshow/boschhdiedc15c2injectionsystemdoc/257003031#21>.
- [4] Y. Le Bihan, S. (et al. (2007)). Comportement dynamique et modélisation d'un injecteur piézoélectrique pour moteurs à combustion interne. Récupéré sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016337545/pdf?md5=21f866b703a315e1975212508797a9a2&pid=1-s2.0-S1474667016337545-main.pdf>.
- [5] A. Ferretti , (2000), Récupéré sur, Modélisation et simulation d'un injecteur solénoïde pour moteurs à combustion interne, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216313200/pdf?md5=40f25a107d5bfd85efa83285af155c37&pid=1-s2.0-S1876610216313200-main.pdf>.
- [6] Y. Le Bihan, (2007), Récupéré sur, Comportement dynamique et modélisation d'un injecteur piézoélectrique pour moteurs à combustion interne", <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1468087412455373>
- [7] A. Shafi, (2014), Injecteurs piézoélectriques pour moteurs diesel : état de l'art et perspectives", <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/piezo-injector>.
- [8] Guy.Fillettaz, (2002), classification des moteurs Diesel, Document de la société Delphi.
- [9] A.Amstutz , (1999), Calibration et optimisation d'un contrôleur de moteur diesel à injection directe.
- [10] Andrea Vacca, (2014),"Injecteurs de carburant pour moteurs à combustion interne : une revue", <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/21/4023>.
- [11] Aliyu A. Shafi, (2014), "Injecteurs piézoélectriques pour moteurs diesel : état de l'art et perspectives", <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/piezo-injector>.

- [12] Organisation internationale de normalisation (ISO), Safety devices for protection against excessive pressure - Part 1: Safety valves, <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:4126:-1:en>.
- [13] Organisation internationale de normalisation (ISO), Safety devices for protection against excessive pressure - Part 2 : Pressure relief devices, <https://www.iso.org/standard/34605.htm>.
- [14] Organisation internationale de normalisation (ISO), Road vehicles - Performance of pressure relief valves for pneumatic brake systems, <https://www.newfastener.com/wp-content/uploads/2013/03/ISO-14583.pdf>.
- [15] Société des ingénieurs automobiles (SAE), Sécurité des systèmes de propulsion des véhicules électriques et hybrides électriques - Partie 1 : Exigences des niveaux 1 et 2, <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2017-01-1027/>.
- [16] Société des ingénieurs automobiles (SAE), Sécurité des systèmes de propulsion des véhicules électriques et hybrides électriques - Partie 2 : Protection contre les déversements d'électrolyte et les chocs électriques.
- [17] DSD SL 15-23 Common Rail Injector Test Points EPS205 / EPS815 with CRI_CRIN, https://gcltdiesel.com/wp-content/uploads/2016/08/Common_Rail_Test_Results_205_Legend.pdf.
- [18] Bosch. (2024). <https://www.auto-platinum.com/blogs/235-comment-identifier-la-reference-de-votre-injecteur>.
- [19] Delphi. (2024). Récupéré sur <https://www.auto-platinum.com/blogs/235-comment-identifier-la-reference-de-votre-injecteur>.
- [20] Denso. (2024). Récupéré sur <https://www.auto-platinum.com/blogs/235-comment-identifier-la-reference-de-votre-injecteur>.
- [21] Siemens. (2024). Récupéré sur <https://www.auto-platinum.com/blogs/235-comment-identifier-la-reference-de-votre-injecteur>.

- [22] Antoine, F. (2021, 10 12). MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE. Récupéré sur https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2838/1/FLEISCHMANN_Antoine.pdf.
- [23] Tameson. (2024). Comprendre la conception et le fonctionnement des solénoïdes. Récupéré sur <https://tameson.fr/pages/comprendre-la-conception-et-le-fonctionnement-des-solenoides>.
- [24] Auto Plus, 15.10.2002, Diesel moderne ou traditionnel, <http://boursinp.free.fr/pdgdies3.htm>.
- [25] J. BONNIN. (2013, 02 20). Notice d'utilisation d'opale cal pour la PSDI. Récupéré sur [file:///C:/Users/BEST%20SHOP/Downloads/Notice_PSDI_v1.0%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/BEST%20SHOP/Downloads/Notice_PSDI_v1.0%20(2).pdf).
- [26] Microcontroller.info. PIC18F4550 Microcontroller, Récupéré sur <https://www.microchip.com/en-us/product/pic18f45>.
- [27] Microchip , (2003). Récupéré sur <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>.
- [28] Guangyao Ouyang,, (2019). Récupéré sur, Technologie d'injection de carburant à rampe commune pour le diesel [file:///C:/Users/BEST%20SHOP/Desktop/RT/RT/Important%20An,%20Shijie_%20Li,%20Yuxue_%20Liu,%20Zhenming_%20Ouyang,%20Guangyao%20-%20Common%20rail%20fuel%20injection%20technology%20in%20diesel%20engines%20\(2019,%20John%20Wiley%20&%20Sons\)%20-%20libgen.li.pdf](file:///C:/Users/BEST%20SHOP/Desktop/RT/RT/Important%20An,%20Shijie_%20Li,%20Yuxue_%20Liu,%20Zhenming_%20Ouyang,%20Guangyao%20-%20Common%20rail%20fuel%20injection%20technology%20in%20diesel%20engines%20(2019,%20John%20Wiley%20&%20Sons)%20-%20libgen.li.pdf).
- [29] International Rectifier <https://www.alldatasheet.fr/datasheet-pdf/pdf/68507/IRF/IRFP260N.html>