

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Energies Renouvelables**

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

**Réalisation des convertisseurs DC/DC pour l'utilisation
de la
Pile à combustible**

Présenté par :
Boughefir Sif Elislam

Soutenu le : 31 Mai 2016

Devant le jury composé de :

Mme. Abdeddaim sabrina

Mlle. Saadi Aicha

Mr. Alloui Lotfi

Dr

Dr

Pr

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2015 / 2016

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Energies Renouvelables**

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Réalisation des convertisseurs DC/DC pour l'utilisation de la
Pile à combustible**

Présenté par :

Boughefir Sif Elislam

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. Saadi Aicha

signature

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Abdeddaim Sabrina

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Energies Renouvelables**

Thème :

**Réalisation des convertisseurs DC/DC pour l'utilisation de la
Pile à combustible**

Proposé par : Dr. Saadi Aicha
Dirigé par : Boughefir Sif Elislam

RESUMES (Français et Arabe)

Les piles à combustible sont des sources d'énergie prometteuses dans les applications de véhicules électriques et la production décentralisée. Cependant, une PàC a une faible tension de sortie et une réponse lente en raison de la dynamique de ses auxiliaires. Pour cette raison, un convertisseur DC / DC est nécessaire pour élever cette tension à quelques dizaines de volts afin de pouvoir alimenter nos charges. Ce travail concerne l'étude, le dimensionnement et la commande d'un convertisseur basse tension DC / DC non isolé avec un rapport de transformation élevé pour les applications PàC. Le convertisseur proposé se compose de deux étages de convertisseurs non isolés DC / DC en cascade. Le premier étage est un convertisseur élévateur «BOOST» et le deuxième est un convertisseur «SEPIC». Le choix de chaque convertisseur est basé sur les pertes et le rendement de celui-ci, avec une tension de sortie élevée et une faible ondulation du courant d'entrée. La commande du convertisseur est assurée par la carte arduino.

Mots Clés :

Pile à combustible, Carte Arduino, Convertisseur DC/DC, Convertisseur «SEPIC», Convertisseur «BOOST», Convertisseur (BOOST,SEPIC) en cascade.

ملخص :

خلايا الوقود هي مصدر للطاقة مثير للاهتمام في تطبيقات السيارات الكهربائية و محطات التوليد. و مع ذلك, خلايا الوقود لديها إنتاج جهد منخفض و استجابة بطيئة بسبب ديناميكية الدارات الخارجية المساعدة لها. لهذا السبب, لا بد من مغير للجهد مستمر/مستمر لرفع الجهد المنخفض من عدة عشرات من الفوات لتشغيل الحمل. هذا العمل يهدف إلى دراسة و تصميم و كذلك السيطرة على مغير جهد مستمر مستمر من النوع الغير معزول مع نسبة تحويل عالية لتطبيقات خلايا الوقود. المغير المقترح يتكون من طابقين متسلسلين من مغير جهد مستمر-مستمر من النوع الغير معزول. الطابق الأول يتكون من مغير جهد مستمر / مستمر من نوع رافع « BOOST » أما الطابق الثاني فانه من نوع مستمر/مستمر «SEPIC».

يستند اختيار كل مغير على الضياعات و مردود التحويل مع ضمان تحويل مرتفع و تموج تيار المدخل منخفض. تم التحكم بالمغير المقترح بواسطة بطاقة أرد ويزو.

كلمات مفتاحية :

خلايا الوقود, محول جهد مستمر/ مستمر (BOOST,SEPIC), بطاقة أرد ويزو.

DEDICACE

*Je remercie bien DIEU tout puissant de m'avoir accordé le
courage*

Je dédie ce mémoire:

*A ma chère et incomparable mère (Alah yarhemha) qui est
l'insigne de la tendresse; je te suis reconnaissant pour ton amour,
ton affection, ta tendresse et ton aide morale*

*A mon cher et adorable père pour tout le sacrifice qu'il consenti
afin de m'assurer de sa totale et constante présence durant tous
les cycles scolaires*

A mes chers frères

A mes sœurs

A tout la famille

A tous mes amis sur tous :

*Zoulikha, Jouda, Youcef, Karim, Mehdi, Chaker, Foufou, Dhia,
Riadh, Ahmed, Hamoudi*

Et a tous la promotion d'électrotechnique 2015/2016

Sifo

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères en ver l'encadreur Dr. Aicha Saadi, pour avoir suivi avec intérêt la réalisation de ce travail, l'aide considérable et le soutien moral.

Nos vifs remerciements s'adressent à toute l'équipe du laboratoire de L'énergies renouvelables au niveau de l'Université de Biskra (Dr. Abdeddaim Sabrina, Pr. Betka Achour, Pr. Alloui Lotfi, Dr. Merabeti Youcef, Dr. Dandouga) pour leurs aides.

Enfin nous associons nos remerciements à toute personne d'étant montré coopérant de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Ainsi que tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.



Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison des différentes technologies de piles à combustible.	7
Tableau II.1: Différentes convertisseur DC/DC <<Buck-Boost>>.	25
Tableau III.1 : Cahier de charge d'un convertisseur «BOOST »	28
Tableau III.2 : Cahier de charge d'un convertisseur « SEPIC ».	32
Tableau IV.1 : La fréquence à partir les pwmpins 5 et 6.	41
Tableau IV.1 : La fréquence à partir les pwmpins 9 et 10.	42
Tableau IV.1 : La fréquence à partir les pwmpins 3 et 11.	42

Liste des Figures :

Figure I.1 : Expérience de Sir W. Grove en 1839.	3
Figure I.2 : Pile à combustible au méthanol Ultracell.	5
Figure I.3 : Unité de Pile à combustible.	5
Figure I.4 : Transport par Pile à combustible.	6
Figure I.5 : Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.	8
Figure I.6 : Caractéristique tension et puissance de la pile en fonction de la densité de courant.	9
Figure I.7 : Mise en série des cellules pour réaliser un stack.	10
Figure I.8 : un système à pile à combustible avec ses principaux auxiliaires.	11
Figure I.9 : Schéma synoptique de système pile à combustible.	12
Figure II.1 : Schémas de principe d'un convertisseur survolteur.	15
Figure II.2 : Schéma équivalents du convertisseur survolteur.	15
Figure II.3 : Schéma de rapport de conversion.	16
Figure II.4 : SEPIC.	17
Figure II.5 : SEPIC avec couplage des inductances.	18
Figure II.6 : SEPIC isolé.	18
Figure II.7 : SEPIC k fermé.	19
Figure II.8 : SEPIC k ouverte.	19
Figure II.9 : Formes d'ondes de courant d'un convertisseur SEPIC.	20
Figure II.10 : Formes d'ondes de tension d'un convertisseur SEPIC.	20
Figure III.1 : Schéma bloc d'un convertisseur « BOOST ».	24
Figure III.2 : L'allure de V_{Ch} .	25
Figure III.3 : L'allure zoom de V_{Ch} .	25
Figure III.4 : L'allure d' i_{Ch} .	26
Figure III.5 : L'allure zoom d' i_{Ch} .	26
Figure III.6 : Montage de convertisseur « BOOST ».	27
Figure III.7 : Circuit de puissance convertisseur « BOOST ».	28
Figure III.8 : L'allure de V_{Ch} et signal de commande.	29
Figure III.9 : L'allure d' i_{Ch} .	29

Figure III.10 : L'allure de V_{Ch} et signal de commande.	30
Figure III.11 : L'allure d' i_{ch} .	30
Figure III.12 : Montage de convertisseur « SEPIC ».	31
Figure III.13 : Circuit de puissance de convertisseur « SEPIC ».	32
Figure III.14 : L'allure de V_{Ch} et signal de commande.	33
Figure III.15 : Les allures de V_Q et V_{L1} .	33
Figure III.16 : Les allures de V_Q et V_{L2} .	34
Figure III.17 : Les allures d' I_{L1} et I_{L1} .	34
Figure III.18 : Les allures V_{ch} et I_{c2} .	35
Figure III.19 : Les allures d' I_{c2} et I_D .	35
Figure III.20 : Les allures d' I_{ch} et I_{L2} .	35
Figure IV.1 : Schéma synoptique des circuits de montage réalisé.	37
Figure IV.2 : Schéma réelle des circuits de montage réalisé.	37
Figure IV.3 : La carte arduino ATMEGA2560.	38
Figure IV.4 : Schéma bloc 1 d'un signal MLI(PWM).	39
Figure IV.5 : Schéma bloc 2 d'un signal MLI (PWM).	40
Figure IV.6.a : Rapport cyclique=30%.	42
Figure IV.6.b : Rapport cyclique=80%.	42
Figure IV.7 : Circuits d'isolation entre le circuit de puissance et le circuit de commande.	43
Figure IV.8 : Schéma représentatif d'un optocoupleur.	44
Figure IV.9 : Schéma représentatif d'un circuit intégré TTL7400.	44

Liste des abréviations:

PEMFC : La pile à combustible à membrane d'échange de protons	-
PàC : Pile à combustible	-
DMFC : Les piles au méthanol direct	-
PAFC : Les piles à acide phosphorique	-
AFC : Les piles alcalines	-
SOFC : Les piles à oxydes solides	-
MCFC : Les piles à carbonates fondus	-
N : Le nombre de cellules mises en série qui fixe la tension du stack	-
P_{st} : Puissance électrique brute du stack	(W).
J : Densité de courant	(A/cm ²).
A_s : Surface active des cellules	(m ²).
V : Tension par cellule	(V).
V_{st} : Tension de stack	(V).
I_{st} : Courant de stack	(A).
SEPIC : Single Ended Primary Inductor	-
PFC : correction du facteur de puissance	-
a : Rapport cyclique	-
V_{IN} : Tension d'entrée	(V).
V_{OUT} : Tension de sortie	(V).
V_D : Tension de seuil de la diode	(V).
ΔI_L : L'ondulation de courant	(A).
I_{IN} : Courant d'entrée	(A).
I_{OUT} : Courant de sortie	(A).
f : Fréquence de découpage.	(Hz).
$I_{L(PEAK)}$: Courante crête	(A).
$I_{C1(rms)}$: Courant efficace de condensateur	(A).
ΔV_{C1} : Ondulation de tension crête à crête de condensateur	(V).
V_{ond} : Ondulation de tension	(V).
MLI : Modulation de largeur d'impulsion	-
V_Q : Tension aux bornes de l'iJBT	(V).
PWM : Pulse width modulation.	-

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre I

Généralités sur les piles à combustibles

I. Introduction.	3
I.2. Historique et principe de fonctionnement.	3
I.3.1. Avantages des piles à combustible.	4
I.3.2. Inconvénients des piles à combustible.	4
I.4. Applications des piles à combustibles.	4
I.4.1. Applications portables.	4
I.4.2. Applications stationnaires.	5
I.4.3. Applications dans le transport.	6
I.5. Les différents types de piles à combustible.	6
I.6. La pile à membrane polymère (PEMFC).	7
I.7. Dimensionnement d'un stack.	8
I.8. Fort courant et faible tension de la PàC.	10
I.9. Système pile à combustible.	11
I.10. Conclusion.	12

Chapitre II

Les convertisseurs DC/DC

II.1. Introduction.	13
II.2.1. Le convertisseur survolteur « BOOST ».	15

II.2.2. Rapport de conversion et rendement :	16
II.3. Le convertisseur SEPIC.	17
II.3.1. Introduction.	17
II.3.2. Synoptique de SEPIC.	17
II.3.3. Principe de fonctionnement.	19
II.3.4. Dimensionnement d'un convertisseur SEPIC.	20
a) Rapport cyclique.	21
b) Inductances.	21
c) Condensateur de couplage.	22
d) Condensateur de filtrage.	22
e) Mosfet IJBT.	23
f) Diode.	23
II.4. Conclusion	23

Chapitre III

Réalisation de deux convertisseurs DC/DC

III.1.Introduction.	24
III.2. Le convertisseur DC/DC « BOOST ».	24
III.2.1. Résultat de simulation de convertisseur DC/DC «BOOST ».	24
III.2.1.1. Schéma bloc de simulink.	24
III.2.1.2. La tension V_{Ch} .	25
III.2.1.3. Le courant i_{ch} .	26
III.2.2. Réalisation de convertisseur DC/DC « BOOST ».	27
III.2.2.1. Cahier de charge de convertisseur « BOOST ».	28
III.2.2.2. Essai avec la carte Arduino pour charge résistive pure.	29
III.2.2.3. Essai avec la carte Arduino pour charge R-L.	30
III.3. Le convertisseur DC/DC « SEPIC ».	31
III.3.1. Réalisation expérimentale de convertisseur « SEPIC ».	31
III.3.2. Cahier de charge de convertisseur « SEPIC ».	32
III.4. Conclusion.	23

Chapitre IV

La commande par la carte Arduino

IV.1. Introduction.	37
IV.2.1. La carte Arduino.	38
IV.2.2. Les avantages de la carte Arduino.	39
IV.2.3. Les méthodes de programmé la carte Arduino pour la commande MLI (PWM).	39
IV.2.3.1. MLI (PWM) avec Simulink.	39
IV.2.3.2. MLI (PWM) avec programmation C/C++.	40
IV.2.3.3. Variation de la fréquence par la carte Arduino « UNO».	40
IV.2.3.4. Variation de rapport cyclique.	42
IV.3. Circuit d'isolation.	43
IV.3.1. L'optocoupleur 4N25.	43
IV.3.2. Le circuit intégré TTL7400.	44
IV.4. Conclusion.	44

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

Annexe A

Annexe B

Annexe C

Introduction générale :

La croissance de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable des ressources fossiles, la crise énergétique et l'augmentation du niveau de pollution sont des problèmes majeurs à travers le monde. Des sources d'énergies nouvelles, renouvelables et propres, une pile à combustible est un dispositif qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le principe de fonctionnement d'une PàC est décrit par une réaction chimique d'oxydoréduction. Cette réaction fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Parmi les technologies existantes, la pile à combustible à membrane d'échange de protons bien connue sous le nom de Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), est l'une des technologies les plus prometteuses pour la production d'énergie dans les applications embarquées, en raison d'une densité d'énergie élevée, haut rendement et d'une faible température de fonctionnement. Malgré l'investissement sur la technologie de PàC, plusieurs problématiques restent ouvertes et font l'objet de plusieurs axes d'études comme :

- La création des centrales pour la production d'hydrogène et l'installation d'infrastructures de distribution.
- L'amélioration des matériaux de fabrication de la PàC, et surtout de la membrane, afin de prolonger leur durée de vie.
- La réduction des coûts du système PàC et de sa maintenance.
- La commande du système en vue d'améliorer ses performances.

Cependant, certaines contraintes sont toujours en attente, en particulier sa dynamique lente et sa faible tension produite en sortie. En conséquence, un convertisseur DC/DC est non seulement nécessaire pour élever cette tension jusqu'au niveau de tension du bus DC, mais également pour le conditionnement de la tension de sortie de la pile qui varie fortement avec la charge et pour la réduction de l'ondulation du courant.

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, on va définir le principe de fonctionnement de la PàC et différents types de ses convertisseurs chimiques et les avantages et les inconvénients avec leur domaine d'utilisation.

Dans le deuxième chapitre, on a déterminé et dimensionné la structure de convertisseur DC/DC non isolé pour les applications PàC, notre choix s'est porté donc directement sur le convertisseur « BOOST » et le convertisseur « SEPIC », il s'agit d'une mise en cascade de deux convertisseurs.

Dans le troisième chapitre nous présentons deux parties de travail sont les résultats de la simulation et la validation expérimentale de notre convertisseur « BOOST » et le convertisseur « SEPIC », Le but de notre contribution expérimentale est de vérifier le bon fonctionnement de ces convertisseurs avec la carte de commande Arduino appliquées au convertisseur proposé.

Le quatrième chapitre, présente le circuit de commande qui est la carte Arduino et le circuit d'isolation qui joue le rôle d'isolation entre le circuit de commande et le circuit de puissance.

Chapitre I

Généralités sur les piles à combustibles

I.1. Introduction :

La croissance de la consommation énergétique accompagnée d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ainsi que l'épuisement inéluctable des ressources fossiles, la crise énergétique et l'augmentation du niveau de pollution sont des problèmes majeurs à travers le monde.

Des sources d'énergies nouvelles, renouvelables et propres, une pile à combustible est un dispositif qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une réaction chimique d'oxydoréduction. Cette réaction fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Parmi les technologies existantes, la pile à combustible à membrane d'échange de protons bien connue sous le nom de Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), est l'une des technologies les plus prometteuses pour la production d'énergie dans les applications embarquées, en raison d'une densité d'énergie élevée, haut rendement et d'une faible température de fonctionnement.

I.2. Historique et principe de fonctionnement :

Le principe de la pile à combustible (PAC) a été découvert par Sir William Grove. Celui-ci expérimente en 1839 la première cellule électrochimique figure(I.1) fonctionnant avec de l'hydrogène comme carburant et des électrodes de platine poreux en milieu d'acide sulfurique, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du combustible [1]. Il a appelé ce dispositif une batterie à gaz.

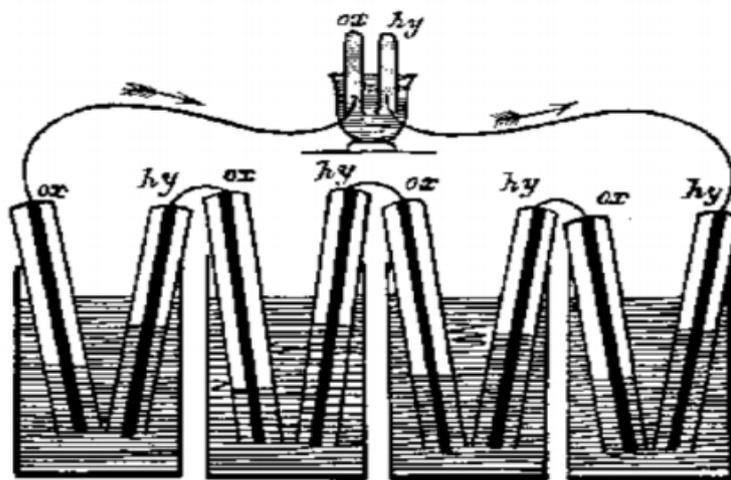


Figure I.1: Expérience de Sir W. Grove en 1839 [2].

I.3.1. Avantages des piles à combustible :

- Haut rendement énergétique : Le rendement énergétique net électrique dépend du type de pile, et généralement élevé.
- Silencieuses : Lors de leur fonctionnement, les piles sont silencieuses : dans les systèmes PAC, seuls certains organes comme les compresseurs, les pompes, le système de ventilation, produisent un léger bruit.
- Emissions de pollution limitées : On cite les piles à combustible comme atout dans la lutte contre la pollution, les émissions produites par un système pile dépendent étroitement du carburant utilisé et de son origine.
- Modularité : Les piles sont constituées de cellules élémentaires mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue. Il est donc possible en adaptant le nombre de cellules ainsi que la surface de chacune d'obtenir toutes les puissances possibles entre 1 kW et plusieurs MW.
- Diverses températures de fonctionnement : dans les deux cas basse ou élevée le fonctionnement de la pile est bien assuré.
- Pas de parties rotatives : Il n'y a aucune partie rotative dans une pile à combustible, aucun mouvement : il n'y a donc pas d'usure mécanique pour le cœur de la pile.

I.3.2. Inconvénients des piles à combustible :

Les piles à combustible présentent beaucoup d'avantages, cependant elles présentent des inconvénients aussi :

- Le coût global [3].
- La fiabilité du système.
- La logistique de production du carburant.

I.4. Applications des piles à combustibles :

On distingue habituellement trois grands types d'applications :

- portables (de quelques milliwatts à quelques kilowatts).
- stationnaires (de quelques centaines de kilowatts au mégawatt).
- transport (de la dizaine à quelques centaines de kilowatts).

I.4.1. Applications portables :

Dans cette famille on inclut essentiellement le téléphone mobile (qui consomme une puissance de l'ordre de 100 mW) et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 30 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol [4]. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle.

La technologie qui est utilisée est la pile PEMFC du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. L'engouement pour ce secteur est tel qu'aujourd'hui de nombreux congrès internationaux ne traitent que de ce sujet : on en est actuellement au stade des prototypes.



Figure I.2: Pile à combustible au méthanol Ultracell.

I.4.2. Applications stationnaires :

La décentralisation de la production d'énergie électrique est un secteur commence à intéresser de nombreux industriels, en particulier aux USA. Dans ce domaine, l'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (NDLR immeubles et industries) les puissances mises en jeu est dans la gamme 200 kW - quelques MW et la production individuelle (NDLR les maisons) les puissances mises en jeu sont dans la gamme 1-5 kW. La PAC est très attendue dans ce domaine et contribuera pour une part importante dans la production décentralisée, la méthode de production de l'électricité de l'avenir[5]. Toutefois, actuellement, la commercialisation de la PAC ne vise que des utilisations finales et non des grands systèmes pour la vente au réseau de distribution. Il y a plusieurs raisons à cela : d'une part, le coût reste encore élevé par rapport à d'autres moyens de production d'énergie électrique qui demandent souvent de grandes puissances.

Les principales applications stationnaires se trouvent dans les secteurs commercial, industriel et résidentiel. Les stations à puissances supérieures de quelques centaines de kilowatts sont rares.



Figure I.3: Unité de Pile à combustible.

I.4.3. Applications dans le transport :

La PAC est un marché à fort potentiel dans le domaine d'application du transport . Grâce à ses caractéristiques intéressantes et au développement rapide de la technologie hybride dans les véhicules. Utilisant l'hydrogène comme combustible, le rendement du moteur électrique à PAC est bien meilleur que les moteurs à l'essence. D'autre part, la faible émission des gaz de la PAC lui apporte une position très concurrente alors que la pollution de l'air est devenue un problème important, surtout dans les grandes villes. De plus, les moteurs silencieux sont un argument supplémentaire pour le transport urbain. L'augmentation continue du nombre de nouveaux systèmes nous permet d'avoir une vue optimiste de ce secteur. D'après les experts de l'industrie automobile, on espère qu'un million de voitures à PAC seront commercialisées en 2025.



Figure I.4: Transport par Pile à combustible.

I.5. Les différents types de piles à combustible :

En règle générale, les différents types des piles à combustible sont classées, d'une part selon la nature de leur électrolyte et d'autre part selon le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé[6]. Il existe actuellement six types de piles à combustible :

- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons PEMFC (ProtonExchange Membranes Fuel Cell).
- Les piles au méthanol direct DMFC (Direct Methanol Fuel Cell).
- Les piles à acide phosphorique PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell).
- Les piles alcalines AFC (Alkaline Fuel Cell).
- Les piles à oxydes solides SOFC (Solid Oxide Fuel Cell).
- Les piles à carbonates fondus MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell).

Le tableau (I.1) récapitule les différents types de piles et leurs caractéristiques respectives.

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkaline Fuel Cell	Polymer Exchange Membran Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxid Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃
Ions dans l'électrolyte	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydant	O ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU)
Niveau de développement	Utilisée	Utilisée	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

Tableau I.1 : Comparaison des différentes technologies de piles à combustible.

I.6. La pile à membrane polymère (PEMFC) :

Une pile à combustible de type PEM est constituée d'un empilement de cellules électrochimiques en série [7], elle intéresse également les industriels pour des applications stationnaires (centaines de kW), portables (jusqu'à 100W) et transportables (de l'ordre de 100kW) [8].

Chaque cellule est le siège d'une réaction électrochimique inverse de l'électrolyse de l'eau, la réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur selon les équations suivantes :



Cette réaction crée une différence de potentiel entre les électrodes de l'ordre du Volt, différence de potentiel qui est propre au couple redox que forment H₂ et O₂. Du fait de ce caractère naturel très basse tension, les constructeurs assemblent plusieurs cellules électrochimiques en série afin d'obtenir une tension suffisamment élevée pour l'exploiter, d'un point de vue électrique, avec un rendement satisfaisant.

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant :

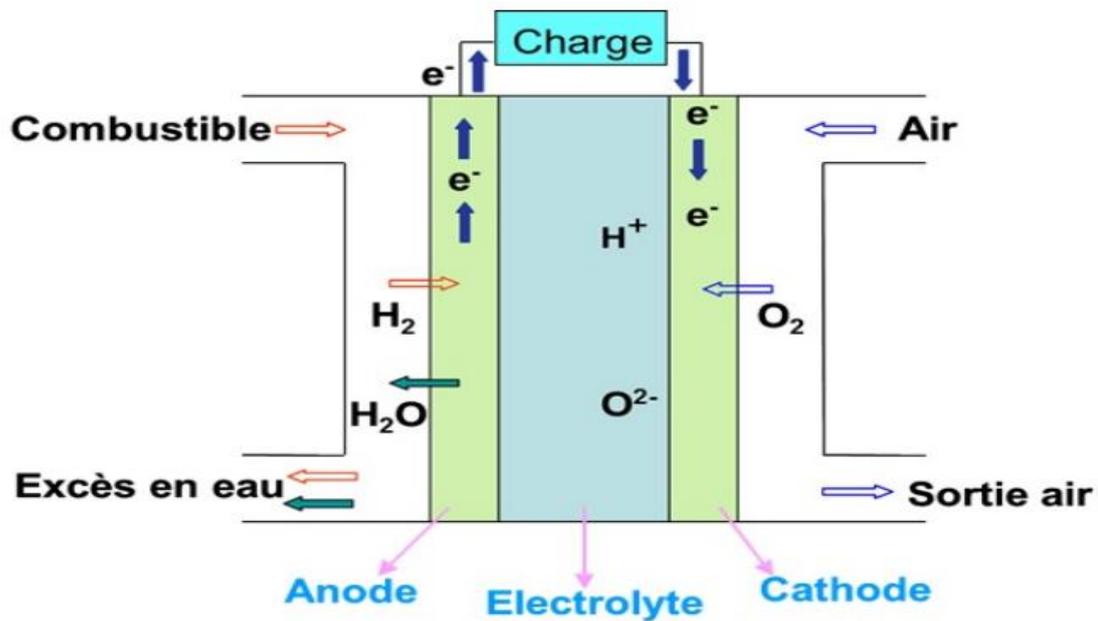


Figure I.5 : Schéma de principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.

L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H^+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux laboratoires sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymériques échangeurs d'ions plus efficaces et également moins coûteux. Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites ou de métaux à base de carbone [9].

I.7. Dimensionnement d'un stack :

Pour concevoir la pile à combustible correspondant au cahier des charges d'un projet donné, le concepteur dispose de deux degrés de liberté [3] :

- Le nombre N de cellules mises en série qui fixe la tension du stack.
- La surface A d'une cellule qui fixe le courant du stack.

Le dimensionnement du stack consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un stack de piles à combustible. Ce dimensionnement doit tenir compte de la puissance nominale de la pile et de la densité de courant que nous souhaitons avoir. La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante :

$$P_{st} = N \cdot V \cdot J \cdot A_s \quad (I.4)$$

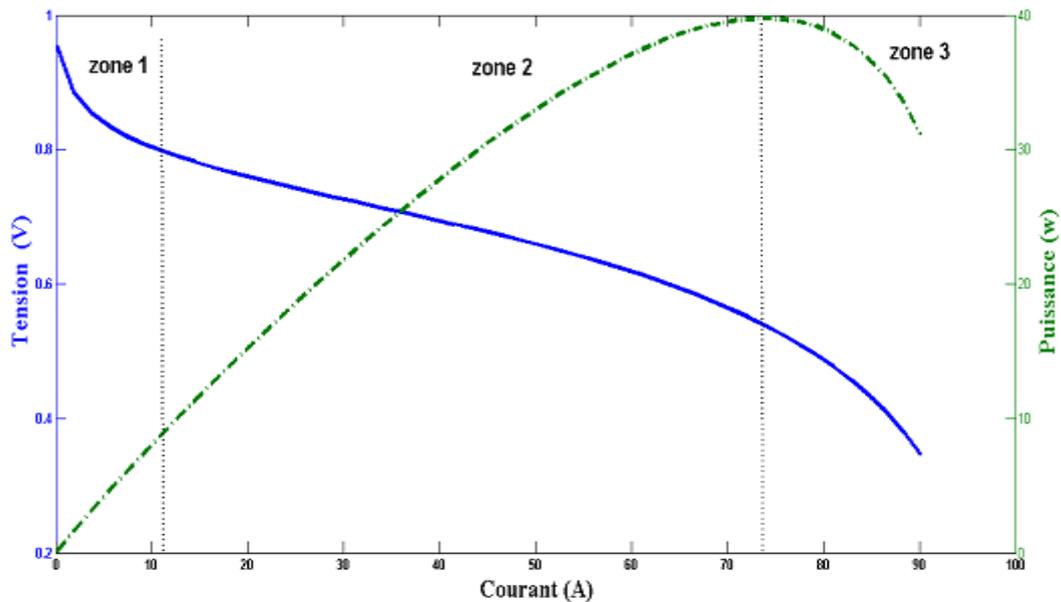


Figure I.6 : Caractéristique tension et puissance de la pile en fonction de la densité de courant.

Avec :

Pst: Puissance électrique brute du stack (W).

N: Nombre de cellules de l'empilement.

V : Tension par cellule (V).

J: Densité de courant (A/cm^2).

As: Surface active des cellules (m^2).

V et J sont liés par la caractéristique tension/courant de la pile, il reste donc trois variables indépendantes à ajuster de façon à obtenir la puissance souhaitée. Les contraintes liées à l'application vont nous permettre de faire les choix nécessaires [10].

Il est intéressant d'avoir la tension V_{st} la plus élevée et donc le courant I_{st} le plus faible possible car cela limite les pertes joule dans la cellule [9].

$$V_{st} = N \cdot V \quad (I.5)$$

$$I_{st} = J \cdot A_s \quad (I.6)$$

Pour satisfaire cette contrainte, il est possible :

- D'augmenter le nombre de cellules jusqu'à la limite technologique actuelle.
- D'augmenter la tension par cellule, en diminuant la densité de courant donc en augmentant la surface de cellule. Ce choix va en outre dans le sens d'un bon rendement de pile [10].

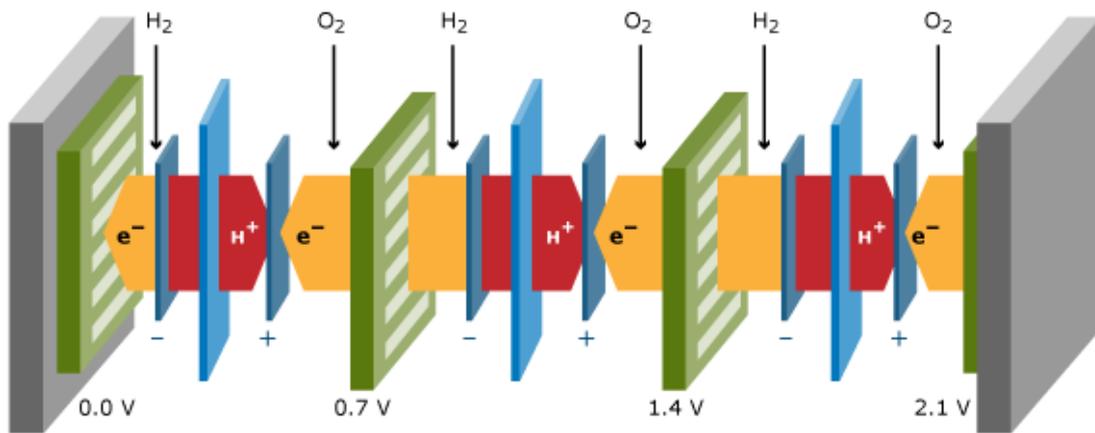


Figure I.7 : Mise en série des cellules pour réaliser un stack.

Les limites technologiques actuelles semblent être : [11]

- $N \leq 100$ dans le cas de plaques bipolaires en graphite, Le nombre est a priori beaucoup plus important dans le cas de plaques bipolaires métalliques.

- Densité de courant $\leq 1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

- $S \leq 800 \text{ cm}^2$.

Les caractéristiques nominales typiques d'une cellule sont :

- Tension typique d'utilisation nominale d'une cellule : 0,7V.

- Tension (pratique) à vide d'une cellule : 1V.

I.8. Fort courant et faible tension de la PAC :

Chaque cellule de PAC génère une tension de 0.6 V nominale à 1 V à vide et une densité de courant nominale de 0.6 A/cm². Pour obtenir des puissances plus élevées, on peut placer plusieurs cellules en série pour augmenter la tension ou bien utiliser des surfaces plus grandes afin de monter en courant. Un ensemble des cellules placées en série est appelé un stack Figure(I.7) Pour des raisons mécaniques, le nombre de cellules en série dans un stack est limité à environ 100 cellules, donc cet ensemble aura une tension nominale autour de 60 V et 100 V à vide. L'augmentation de la puissance unitaire d'un stack nécessite l'augmentation de la surface des cellules. Par exemple, la société Axane a proposé deux gammes de puissance correspondant à deux surfaces des plaques de pile. L'une de 80 cm² pour fournir une puissance de 2,5 kW et l'autre de 550 cm² une puissance de 20 kW. La tension de ces deux gammes reste dans la même plage entre 60 V et 100 V. Dans ces conditions, nous voyons bien que nous sommes dans le domaine fort courant et faible tension[12].

I.9. Système pile à combustible :

La tension maximale théorique de cellule d'une pile à combustible est environ 1.23 V [13]. Sa capacité de courant dépend de la surface cellulaire.

Pour obtenir des niveaux de tension et de courant qui sont bien adaptés pour les applications, plusieurs piles à combustible sont reliés en série. Cet ensemble est appelé empilement de piles à combustible ou pile stack.

Un stack de pile à combustible nécessite pour son fonctionnement l'ajout de plusieurs appareils auxiliaires destinés à l'alimentation et au conditionnement des gaz, à la gestion de l'humidification de la membrane et au contrôle de la température de fonctionnement du système [14-15] figure(I.8).

Généralement, un système pile à combustible est constitué d'un cœur de pile, de l'alimentation en hydrogène, de l'alimentation en air, d'un circuit de refroidissement, d'un circuit d'humidification, d'un convertisseur statique et enfin d'un système de contrôle.

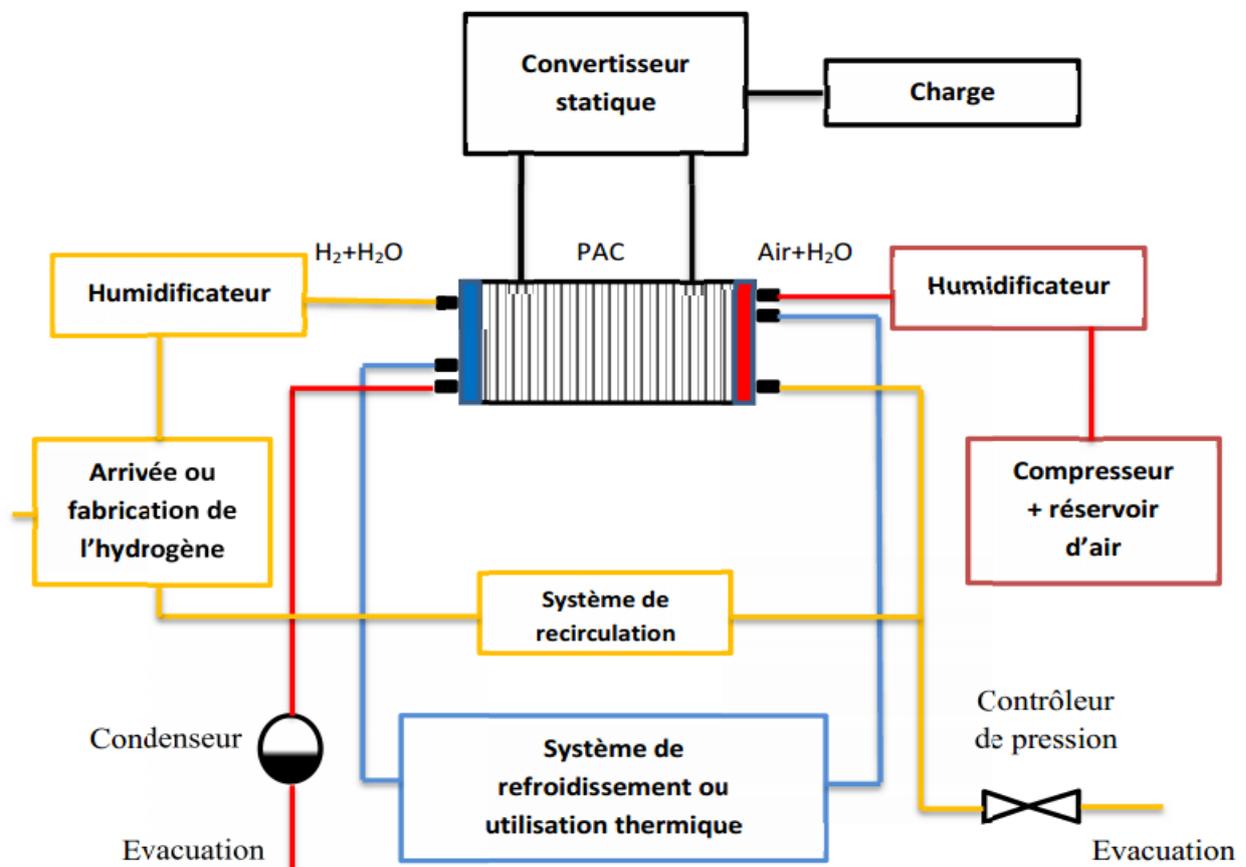


Figure I.8 : Un système à pile à combustible avec ses principaux auxiliaires.

Les auxiliaires d'une pile à combustible consomment une partie non négligeable de l'énergie produite par celle-ci, entraînant ainsi la dégradation de rendement du système. Leur conception est donc souvent un élément très important dans le développement d'un système pile à combustible.[16]

Les convertisseurs avec «attaque en courant», type convertisseur survolteur semblent être les mieux positionnés sur la liste des convertisseurs susceptibles d'être associés avec les piles à combustible :

- d'une part, parce qu'ils imposent intrinsèquement un niveau de filtrage sur leur courant d'entrée.
- d'autre part parce que ce sont généralement des structures élévatrices en tension, caractéristique très souvent recherchée des convertisseurs pour piles à combustible.

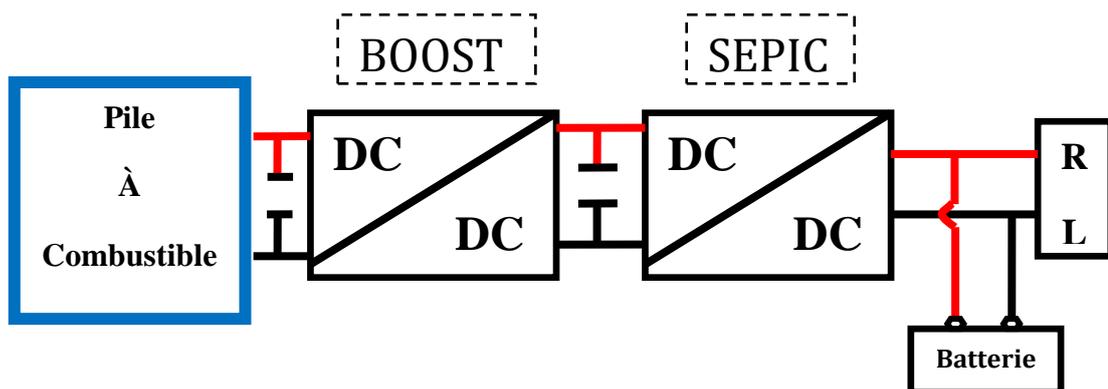


Figure I.9 : Schéma synoptique de système pile à combustible.

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté un état de l'art de la pile à combustible, puis son principe de fonctionnement et les différents types existants, suivit d'une comparaison entre elles. Un bref aperçu a été mentionné sur les auxiliaires des piles, qui contribuent au bon fonctionnement de ces dernières. La pile PEMFC, a été choisie pour notre travail, vu qu'elle répond aux exigences du cahier de charge, à savoir son faible poids et sa température de fonctionnement.

Le chapitre suivant est totalement consacré aux convertisseurs statiques basse tension, associés à la pile à combustible, qui peuvent être utilisés comme interface entre cette pile et une charge électrique.

Chapitre II

Les convertisseurs DC/DC

II.1. Introduction :

Les piles à combustible se caractérisent par la délivrance d'un courant continu élevé sous une tension continue généralement assez faible. Une seule cellule produit environ une tension de 1v. Afin d'augmenter cette tension à la sortie de la pile, plusieurs cellules sont empilées. Le Fuel Cell stack a une durée de vie et une fiabilité réduite et dépend de la cellule la plus faible. Afin de maintenir la fiabilité et la durée de vie à une limite raisonnable, la tension de sortie de l'empilement de PàC est limitée à environ 100 v [16]. Pour beaucoup d'applications, cette tension est insuffisante.

On est alors amené à placer un convertisseur DC/DC entre la pile et la charge électrique dont le rôle est d'élever la tension délivrée par la pile. Cet étage de conversion est, en outre, indispensable en raison de la variation de la tension délivrée en fonction de la charge qui peut atteindre au moins 20 % de la tension nominale.

Afin d'être optimaux, les convertisseurs DC/DC doivent répondre à de nombreuses problématiques dans les applications véhicule électrique à pile à combustible, telles que [17]:

- Haute efficacité énergétique.
- Haute densité de puissance.
- Faible masse et petit volume.
- Ondulation de courant réduite afin de prolonger la durée de vie de la pile combustible.
- Faible coût.
- Faible perturbation électromagnétique.

les convertisseurs non isolés, sont les plus prisés, vu leurs rendement important, leurs faible poids et surtout facile à commander . Ces convertisseurs généralement recommandés pour les applications moyennes puissance comme les véhicules électriques.

Dans ce chapitre, et dans un premier temps, quelques exemples d'architectures des convertisseurs statiques DC/DC pour les applications PàC dans le tableau (II.1) ont été présentés, et peuvent réduire l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation de la tension de sortie.

Donc en à étudié différentes convertisseur DC/DC parmi ces convertisseurs, le convertisseur élévateur « BOOST » pour élever la tension à la sortie de la pile à combustible, il est nécessaire pour l'augmentation de tension ça en première étage, dans le deuxième étage on à dimensionné et réalisé un convertisseur « SEPIC » pour délivrer la tension suffisante pour la charge.

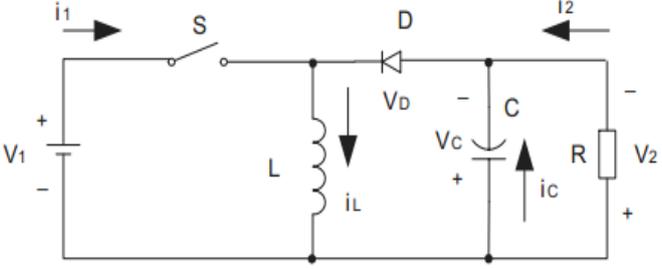
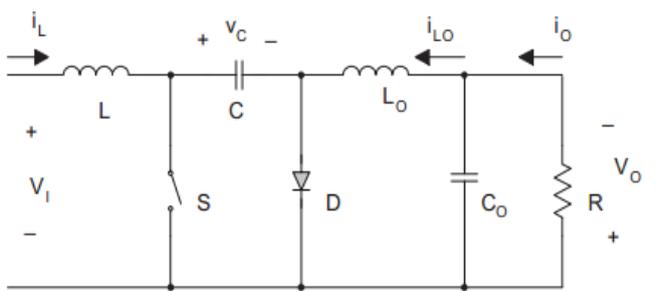
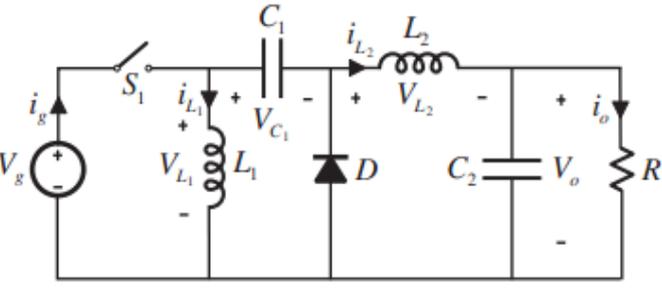
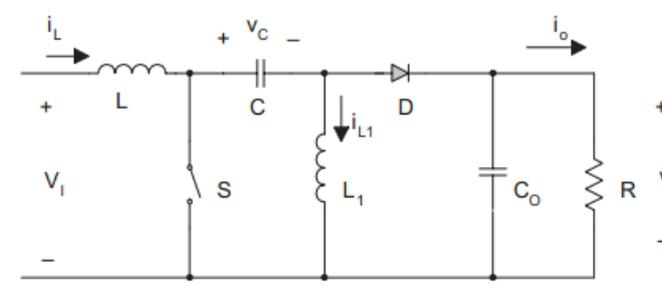
Circuit Configuration	Avantages	Inconvénients
 <p style="text-align: center;">❖ Buck-Boost</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Simple configuration. * Moins de composants à haute fiabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> * Grande entrée et sortie de courants. * Polarité de sortie inverse.
 <p style="text-align: center;">❖ CUK</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Courant d'entrée et de sortie continue. * Zéro-ondulation de courant de sortie par couplage des deux inductances. 	<ul style="list-style-type: none"> * Grand taille de L. * Grand voltage et courant de IGBT ; D et C. * Polarité de sortie inverse.
 <p style="text-align: center;">❖ Zéta</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Petite voltage de C1. * Polarité non inverse. * Zéro-ondulation de courant de sorties par couplage de deux inductances. 	<ul style="list-style-type: none"> * Grand voltage et courant de IGBT ; D. * Grand taille. * Plus élevé poids.
 <p style="text-align: center;">❖ Sepic</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Zéro-ondulation de courant de sortie par couplage de deux inductances. * Polarité non inverse. 	<ul style="list-style-type: none"> * Grand courant d'appelle de C0. * Plus de composants. * Moins fiabilité.

Tableau II-1 : Différentes convertisseur DC/DC « Buck-Boost » [23].

II.2.1. Le convertisseur survolteur « BOOST » :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « BOOST » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe est celui de la figure (II.1). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [18].

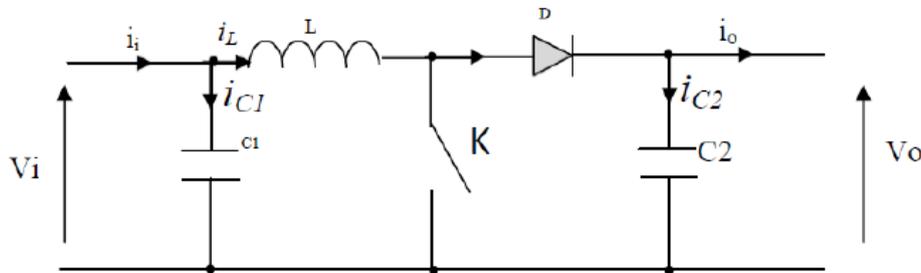


Figure II.1 : Schéma de principe d'un convertisseur survolteur.

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir figure II.2) des deux phases de fonctionnement donne [19] :

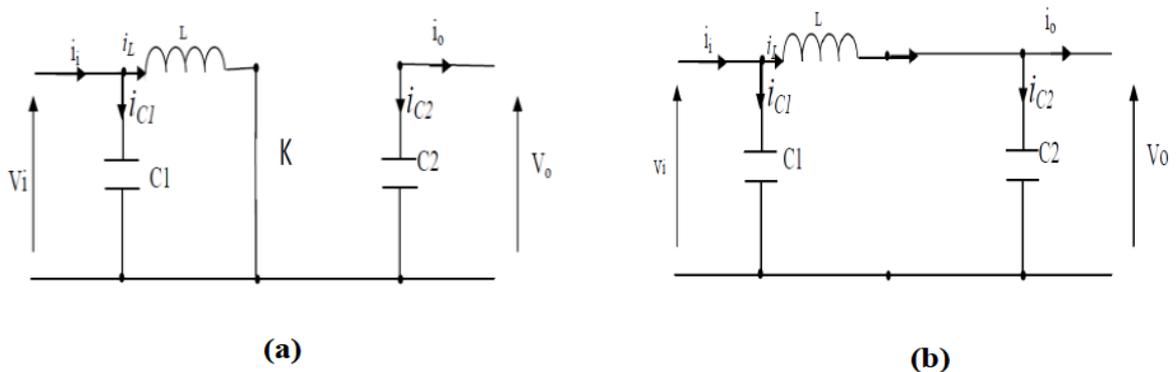


Figure II.2 : Schéma équivalents des deux modes de fonctionnement du convertisseur survolteur.

(a) : \$K\$ fermé, (b) : ouvert.

Pour la première période \$d.T_s\$:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_o(t) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad \text{II.1}$$

Pour la deuxième période \$(1-d) T_s\$:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad \text{II.2}$$

Pour trouver représentation dynamique valable pour toute la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante [19] :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt}_{DT_s} dT_s + \frac{dx}{dt}_{(1-D)T_s} (1-d) T_s \quad \text{II.3}$$

Ou $X = [V_{c2}, i_L]$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équation (II.1) et (II.2), comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [19] :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_L - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L \frac{di_L}{dt} + (1-d)V_0 \end{cases} \quad \text{II.4}$$

II.2.2. Rapport de conversion et rendement :

On peut calculer le rapport de conversion $\frac{V_0}{V_i}$ par :

$$M(a) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-a} \quad \text{II.5}$$

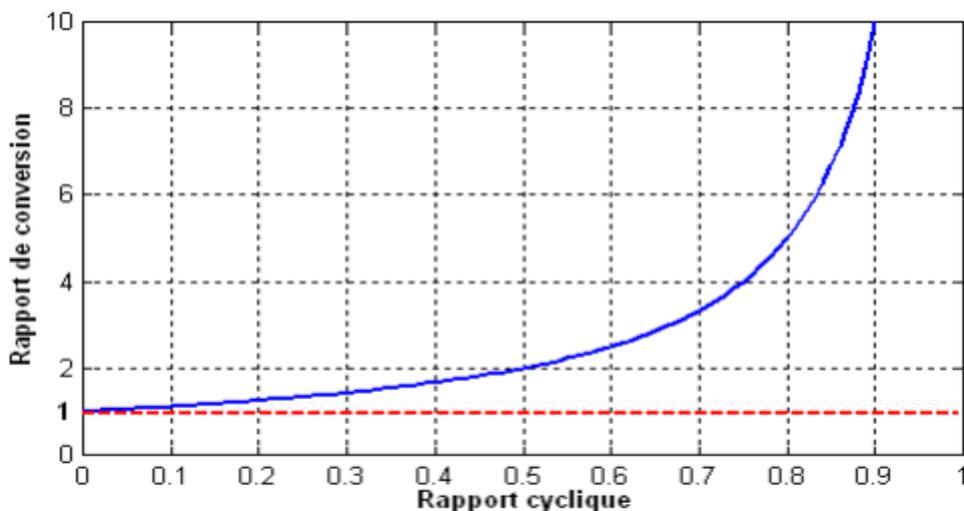


Figure II.3 : Schéma de rapport de conversion.

II.3. Le convertisseur SEPIC :

II.3.1. Introduction :

Le convertisseur SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) a été conçu à la fin des années 1970 par Slobodan Cuk. La structure du hacheur SEPIC se déduit du hacheur capacitif dit hacheur Cuk par permutation de la diode et de l'inductance de sortie. Il présente des caractéristiques similaires à celle du hacheur Cuk, à l'exception qu'il est non inverseur de tension. La tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée. Le convertisseur SEPIC est composé de deux inductances $L1$ et $L2$. Elles peuvent être bobinées sur le même circuit magnétique, à tendance à coûter moins chère que deux inductances séparées. La tension de sortie dépend du rapport cyclique appliqué à l'interrupteur K [20].

La topologie du SEPIC est appropriée pour les applications de charge de batteries.

Les avantages du convertisseur SEPIC dans les applications des énergies renouvelables sont nombreux :

- il peut fonctionner comme élévateur ou abaisseur de tension.
- la commande du transistor se réfère à la masse.
- l'ondulation du courant d'entrée est limitée.

Il n'y a pas de liaison entre entrée et sortie en continu, grâce à la transmission d'énergie en série à travers un condensateur. Un court-circuit de la charge n'est donc pas répercuté sur l'entrée [21].

II.3.2. Synoptique de SEPIC :

Le convertisseur SEPIC peut être réalisé de diverse manière. La Figure (II.4) présente la structure basique, la Figure (II.5) montre le couplage des inductances $L1$ et $L2$ et la Figure(II.6) la version isolée du SEPIC en remplaçant l'inductance $L2$ par un transformateur.

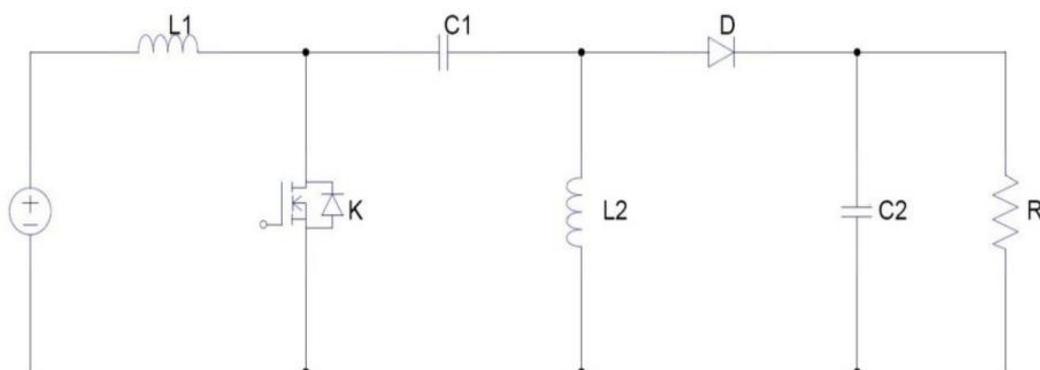


Figure II.4 : Convertisseur SEPIC.

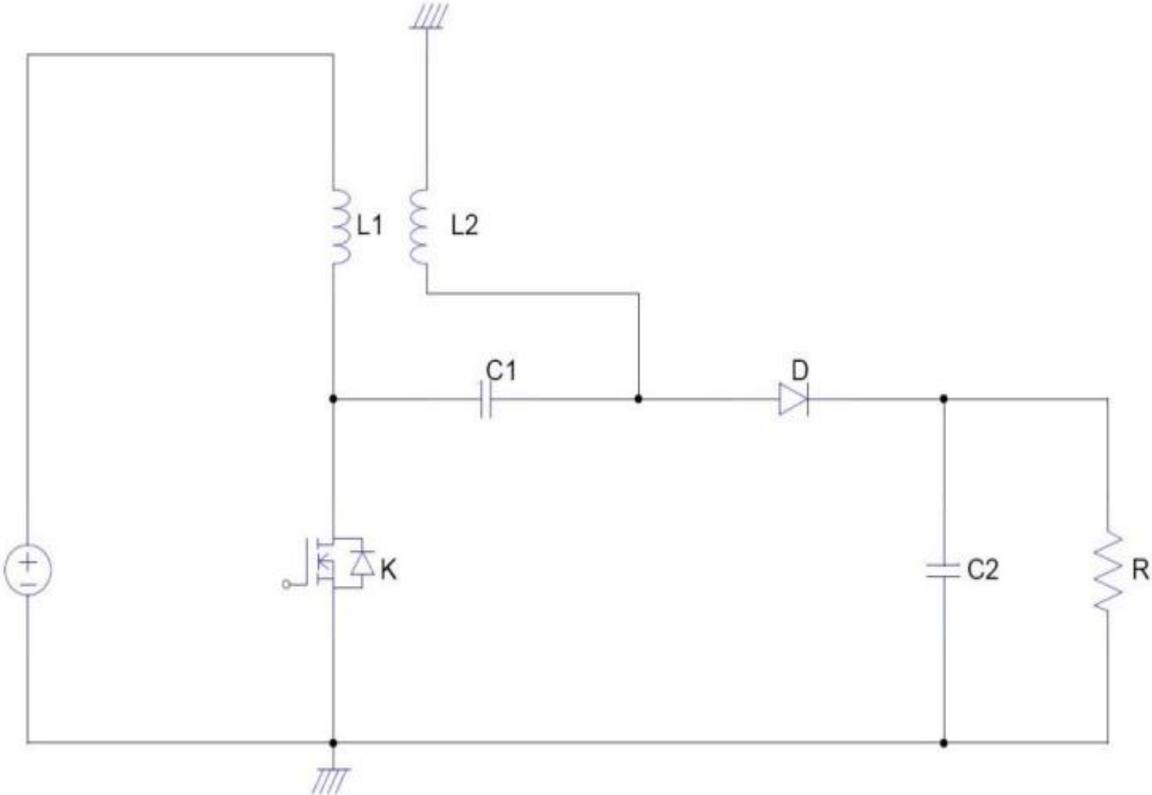


Figure II.5 : SEPIC avec couplage des inductances.

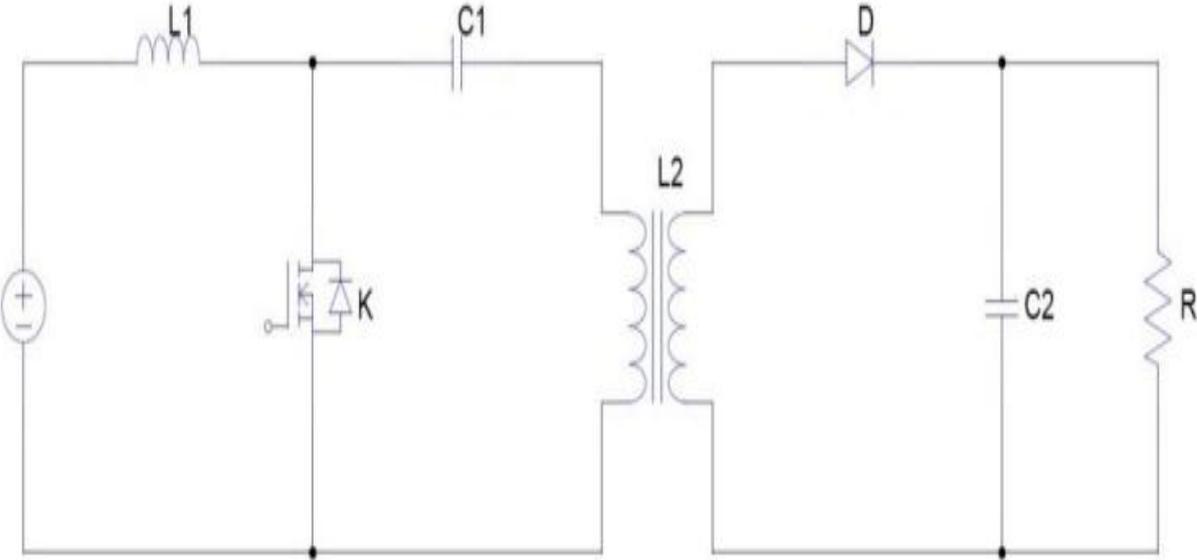


Figure II.6 : SEPIC isolé.

II.3.3. Principe de fonctionnement :

L'étude se fait en deux parties selon l'état de conduction de l'interrupteur K.

A) On ferme l'interrupteur K.

De 0 à αT : *Phase d'accumulation d'énergie.*

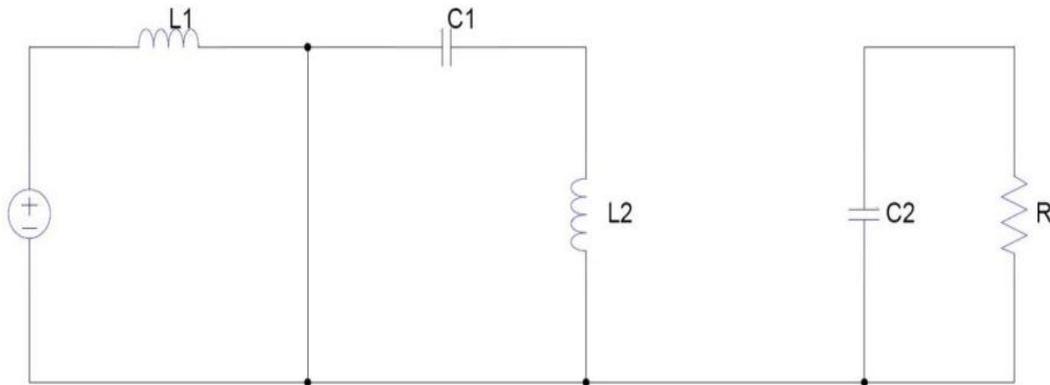


Figure II.7 : SEPIC k fermé.

On applique aux bornes de l'inductance $L1$ la tension d'entrée V_e , le courant traversant $L1$ va augmenter linéairement, l'énergie est stockée dans $L1$. L'énergie contenue dans le condensateur $C1$ passe dans l'inductance $L2$, et celle du condensateur $C2$ vers la charge. La tension est maintenue constante par la le condensateur $C2$.

B) On ouvre l'interrupteur K, ainsi la diode D se met à conduire.

De αT à T : *Phase de roue libre.*

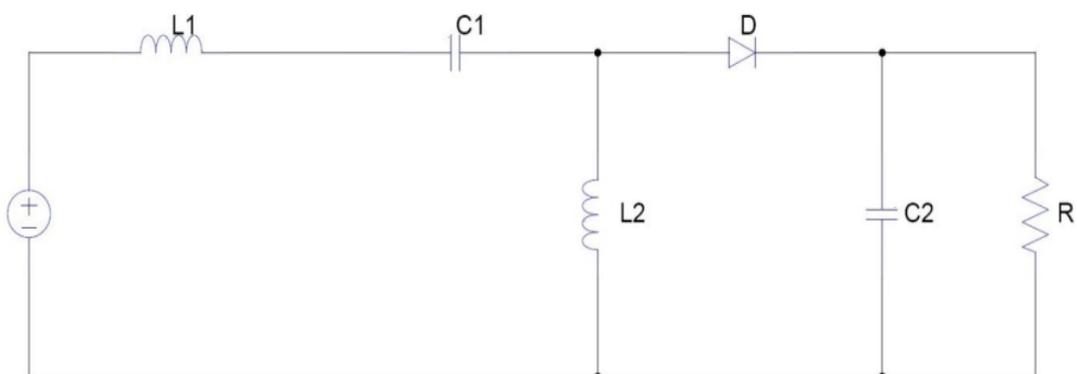


Figure II.8 : SEPIC k ouverte.

L'énergie emmagasinée dans l'inductance $L1$ est restituée dans le condensateur $C1$. L'énergie dans $L2$ est transférée vers $C2$.

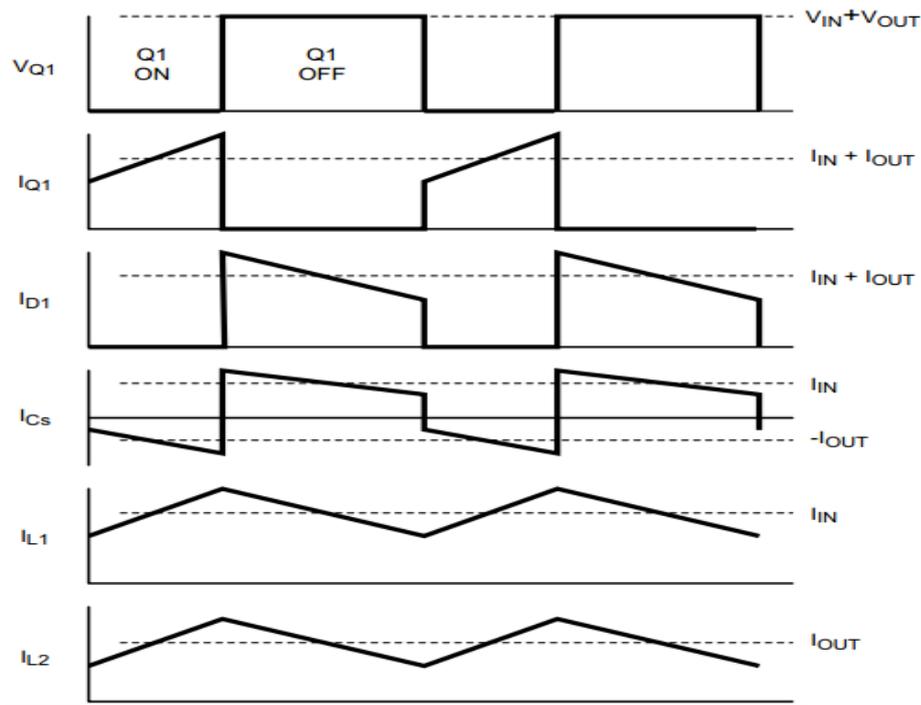


Figure II.9 : Formes d'ondes de courant d'un convertisseur SEPIC [22].

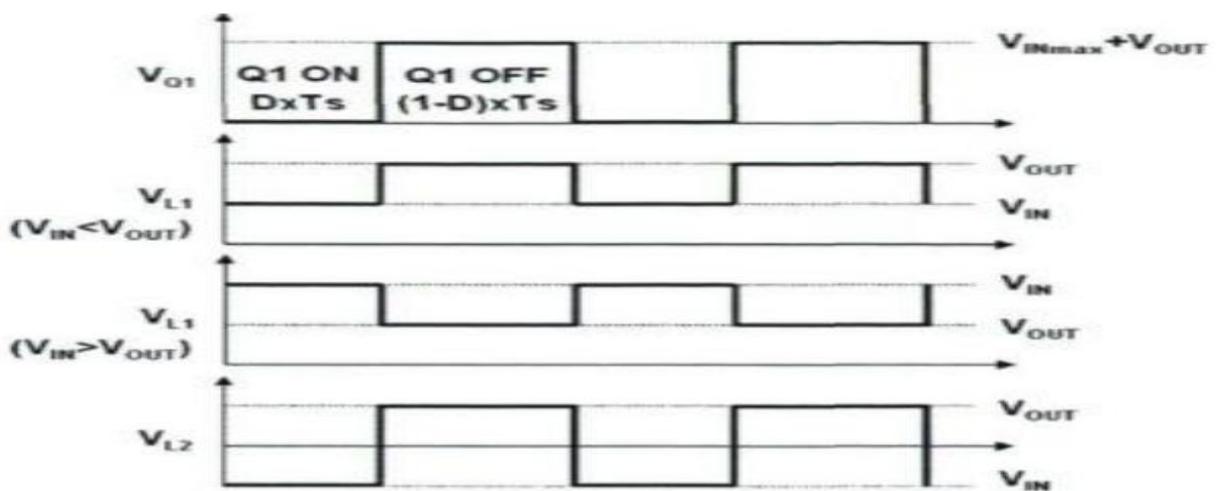


Figure II.10 : Formes d'ondes de tension d'un convertisseur SEPIC [21].

II.3.4. Dimensionnement d'un convertisseur SEPIC :

Seul le fonctionnement en conduction continue du convertisseur est étudié, c'est-à-dire que le courant dans l'inductance ne s'annule jamais en zéro avant la fin d'un cycle de fonctionnement. De part la complexité de ce convertisseur, et le manque de littérature sur celui-ci, nous ne l'étudierons pas phase par phase. Nous utiliserons seulement les équations finales permettant de dimensionner les éléments du convertisseur [20][22].

a) Rapport cyclique :

Le rapport cyclique est donné par :

$$a = \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN} + V_{OUT} + V_D} \quad \text{II.6}$$

Avec V_{IN} la tension d'entrée, V_{OUT} la tension de sortie et V_D la tension de seuil de la diode. Avec un rapport cyclique proche de 50%, la tension d'entrée est égale à la tension de sortie, le gain est unitaire.

Le rapport cyclique varie en fonction de la tension d'entrée appliquée afin d'avoir une tension de sortie constante. Ainsi le rapport cyclique maximal est :

$$a = \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN(min)} + V_{OUT} + V_D} \quad \text{II.7}$$

b) Inductances :

Les valeurs d'inductances sont déterminées principalement par l'ondulation de courant acceptée.

Généralement, on autorise une ondulation de 40% le courant d'entrée maximal pour la tension d'entrée minimale. L'ondulation de courant est définie par l'équation suivante :

$$\Delta I_L = I_{IN} \times 40\% = I_{OUT} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} \times 40\% \quad \text{II.8}$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L1 = L2 = L = \frac{V_{IN(min)}}{\Delta I_L \times f} \times a_{max} \quad \text{II.9}$$

Avec : f la fréquence de découpage.

Pour s'assurer que le courant dans l'inductance ne sature pas, la courante crête est donné par :

$$I_{L1(peak)} = I_{OUT} \times \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN(min)}} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad \text{II.10}$$

$$I_{L2(peak)} = I_{OUT} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad \text{II.11}$$

Si les inductances L1 et L2 sont bobinées sur le même circuit magnétique, les valeurs d'inductances sont remplacées par 2L à cause de la mutuelle inductance. Les valeurs d'inductances sont alors :

$$L1' = L2' = \frac{L}{2} = \frac{V_{IN(min)}}{2 \times \Delta I_L \times f} \times a_{max} \quad \text{II.12}$$

c) Condensateur de couplage :

Le condensateur de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace donné par :

$$I_{C1(rms)} = I_{OUT} \times \sqrt{\frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN(min)}}} \quad \text{II.13}$$

Le condensateur est dimensionné à partir de l'ondulation de tension crête à crête voulue définie par la formule suivante :

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_{OUT} \times a_{max}}{C1 \times f} \quad \text{II.14}$$

d) Condensateur de filtrage :

Le condensateur C2 à la sortie du convertisseur SEPIC permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante. La formule permettant de dimensionner le condensateur est donnée par :

$$C2 = \frac{I_{OUT} \times a_{max}}{V_{ond} \times 0.5 \times f} \quad \text{II.15}$$

Avec :

I_{out} le courant dans la charge, V_{ond} l'ondulation de tension.

e) Mosfet IJBT :

Le transistor doit être capable de supporter une tension :

$$V_K = V_{IN} + V_{OUT} \quad \text{II.16}$$

Et être traverser par un courant crête égal à :

$$I_{K(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)} \quad \text{II.17}$$

Le courant efficace est donné par :

$$I_{K(rms)} = I_{OUT} \times \sqrt{\frac{(V_{OUT} + V_{IN(min)} + V_D) \times (V_{OUT} + V_D)}{V_{IN(min)}^2}} \quad \text{II.18}$$

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par le transistor soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations.

f) Diode :

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant $I_{D(peak)} = I_{K(peak)}$. Elle doit résister à une tension inverse de

$$V_D = V_{IN(max)} + V_{OUT(max)} \quad \text{II.19}$$

Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie I_{OUT} .

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par la diode soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations. Il est recommandé de choisir des diodes Schottky pour limiter ses pertes.

II.4.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures des convertisseurs DC/DC pour les applications des piles à combustible. Aussi nous avons présenté leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients, et le dimensionnement de deux convertisseurs DC/DC « BOOST » et « SEPIC ». On a présenté les directives nécessaire, pour un concepteur à choisir les topologies de convertisseurs appropriés en termes de rendement, la complexité, le coût et la fiabilité pour une application particulière.

Dans la troisième chapitre on fait la simulation et la réalisation pratique de ces convertisseurs.

Chapitre III

**Simulations et
réalisations de deux
convertisseurs DC/DC**

III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, on a déterminé et dimensionné la structure de convertisseur DC/DC non isolé pour les applications PàC, notre choix s'est porté donc directement sur les convertisseurs « BOOST » et le convertisseur « SEPIC », il s'agit d'une mise en cascade de deux convertisseurs.

Nous présentons dans ce chapitre deux parties de travail ; les résultats de la simulation et la validation expérimentale du convertisseur « BOOST » et le convertisseur « SEPIC » étudié précédemment. La validation expérimentale a été effectuée au niveau du laboratoire des énergies renouvelables Biskra, Le but de notre contribution expérimentale est de vérifier le bon fonctionnement de ces convertisseur avec la carte de commande Arduino appliquées au convertisseur proposé, vu la non disponibilité d'une PàC au sein du laboratoire, une source continue limitée à 3 A a été utilisée.

III.2. Le convertisseur DC/DC « BOOST » :

III.2.1. Résultat de simulation de convertisseur DC/DC « BOOST » :

III.2.1.1. Schéma bloc de Simulink :

La figure (III.1) représente le schéma bloc Simulink d'un convertisseur « BOOST », le programme de dimensionnement et de calcul des données est dans l'annexe C.

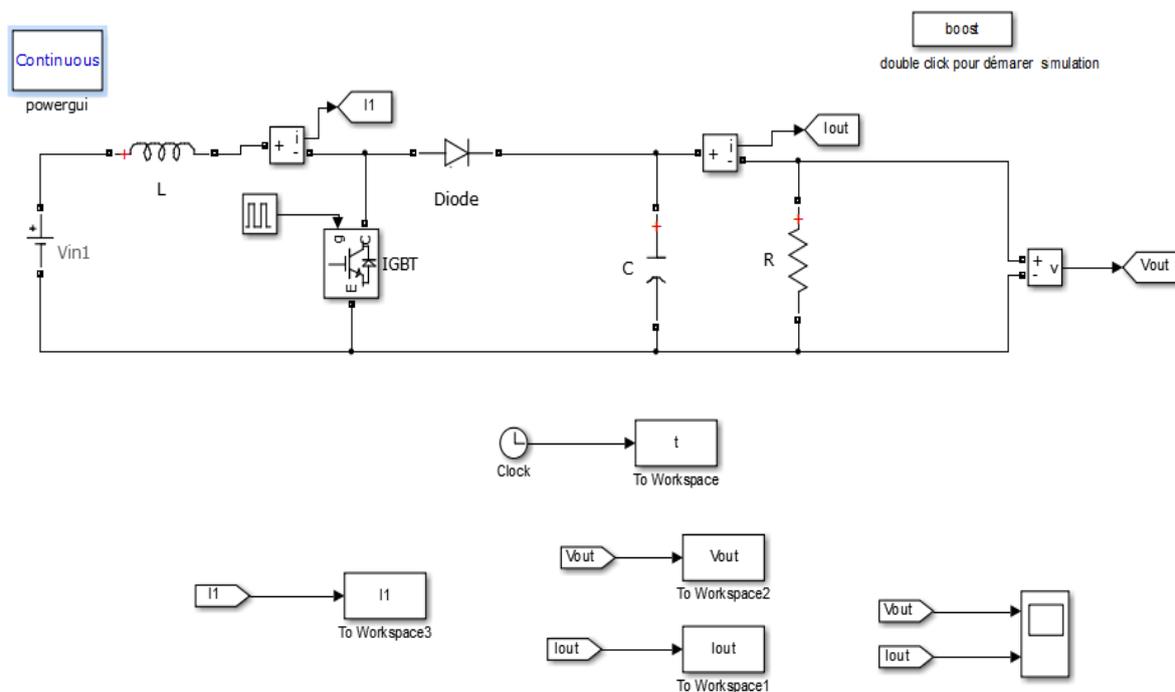
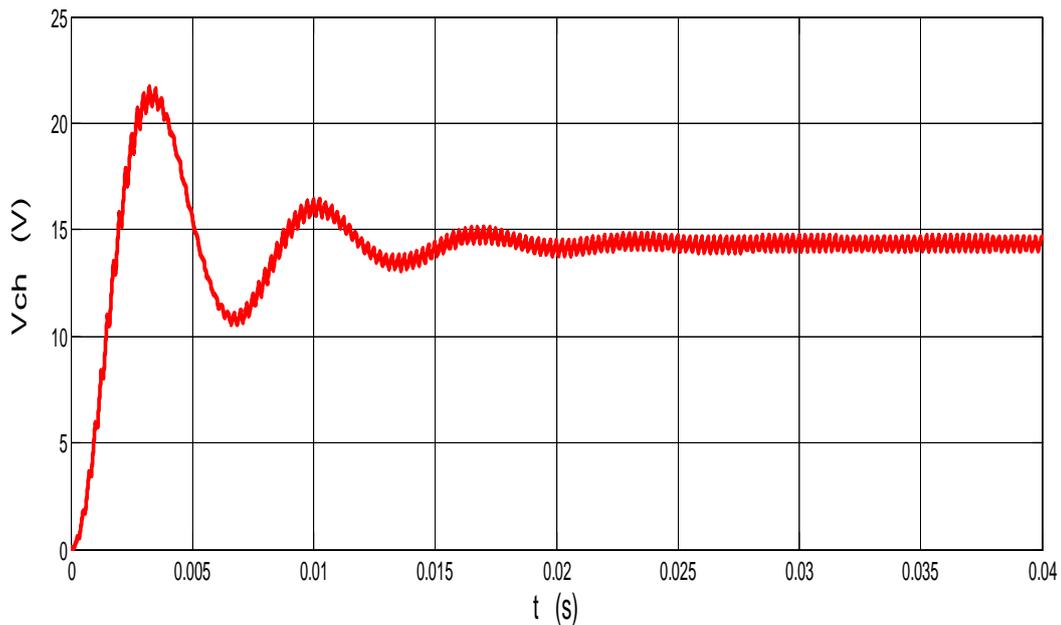
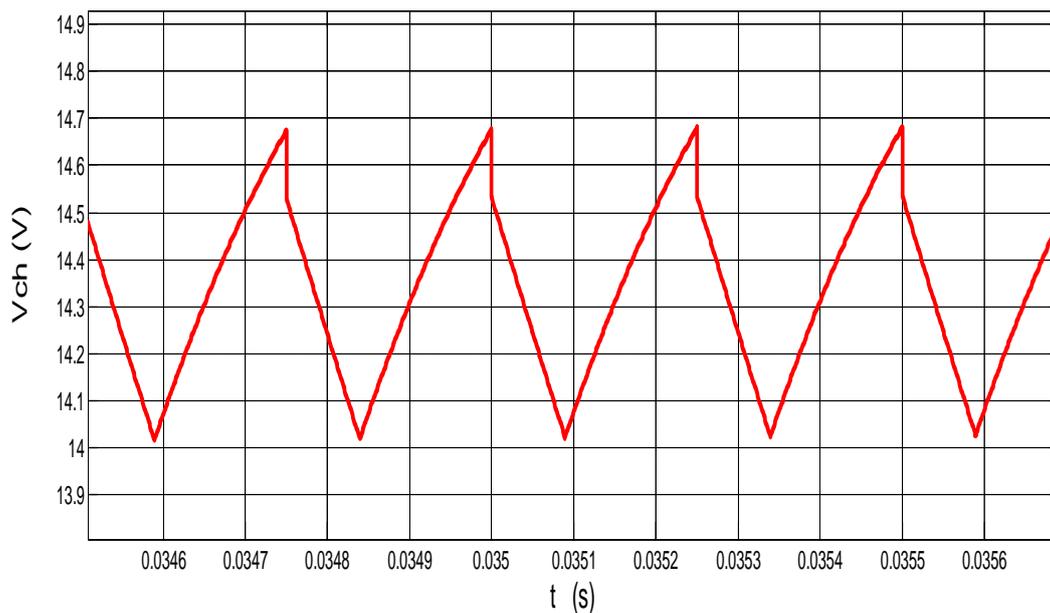


Figure III.1 : Schéma bloc d'un convertisseur « BOOST ».

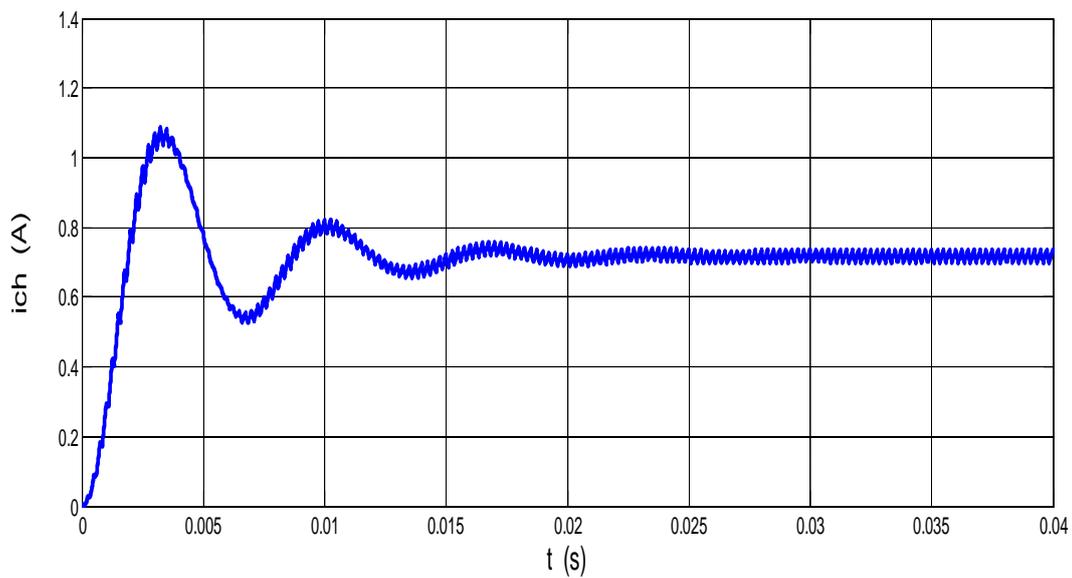
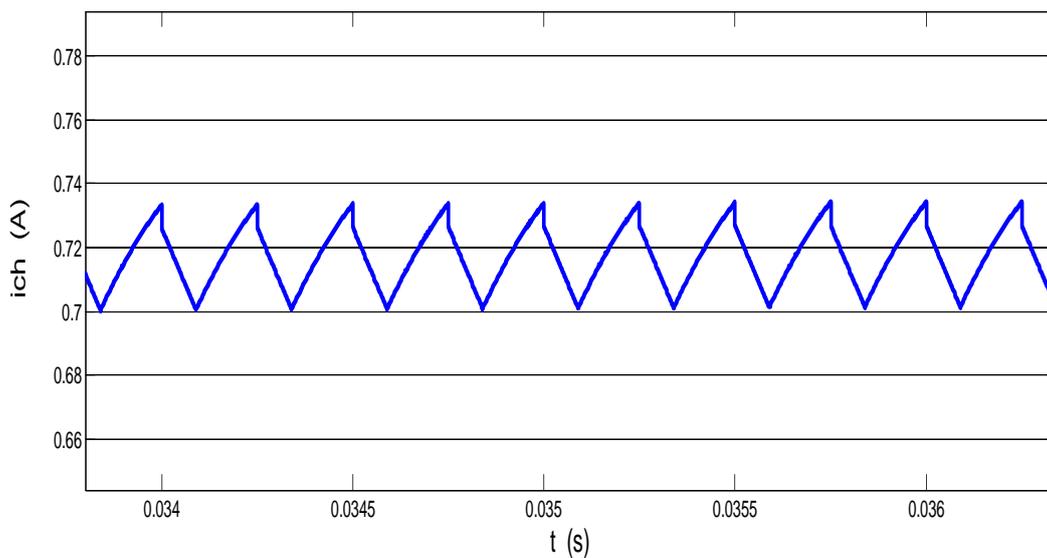
III.2.1.2. La tension V_{Ch} :

La figure (III.2) montre l'allure de la tension V_{Ch} en deux régimes le première régime est le régime transitoire de 0-0.025 s, il ya des pics qui arrive à la tension $V_{Ch}=22$ V, et le régime permanent comme La figure (III.3) qui est le zoom de La figure (III.2) dans le temps 0.035 s, qui montre la valeur moyenne de la charge est $V_{Ch(moy)}=14.35$ V et il ya une ondulation de tension la valeur maximal est de $V_{Ch(max)}=14.65$ V et la valeur minimal de la charge est $V_{Ch(min)}=14.05$ V.

**Figure III.2 :** L'allure de V_{Ch} .**Figure III.3 :** L'allure zoom de V_{Ch} .

III.2.1.3. Le courant i_{ch} :

La figure (III.4) montre l'allure de courant i_{ch} en deux régimes le première régime est le régime transitoire de 0-0.025 s, c'est comme l'allure de la tension V_{ch} , il ya des courant de pic qui arrive à $i_{ch} = 1.14$ A, et le régime permanent comme La figure (III.5) qui est le zoom de La figure (III.4) environ le temps 0.035 s, qui montre la valeur moyen de la charge est environ $i_{ch(moy)} = 0.715$ A et il ya une ondulation de courant donne la valeur maximal est environ de $i_{ch(max)} = 0.73$ A, la valeur minimal de la charge est $i_{ch(min)} = 0.7$ A.

**Figure III.4 :** L'allure d' i_{ch} .**Figure III.5 :** L'allure zoom d' i_{ch} .

III.2.2. Réalisation de convertisseur DC/DC <<BOOST>> :

La validation expérimentale de notre convertisseur « BOOST » proposé étudié précédemment dans le chapitre(II) et simulé dans la partie (III.2.1) de ce chapitre a été validé expérimentalement et effectuée au niveau de laboratoire des énergies renouvelables Biskra, Le but de notre contribution expérimentale est de vérifier le bon fonctionnement de ce convertisseur avec la carte de commande Arduino appliquées au convertisseur proposé comme la figure (III.6) montre le montage de notre travaille.

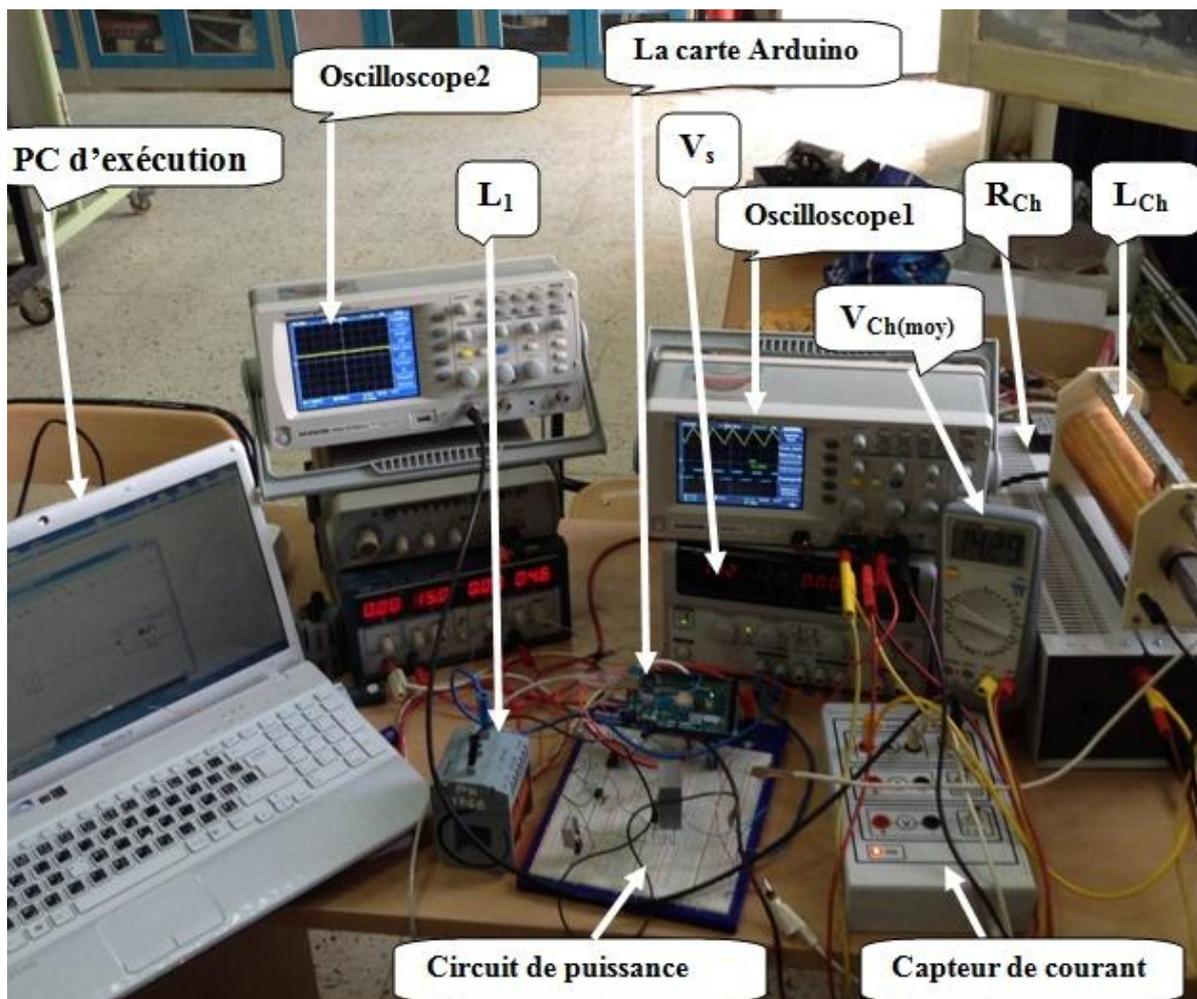


Figure III.6 : Montage de convertisseur « BOOST ».

La figure (III.6) montre le banc d'essai réalisé au laboratoire des énergies renouvelables avec le matériel disponible pour assuré le bon fonctionnement de convertisseur « BOOST » ainsi la carte de commande Arduino et un PC d'alimentation et de compilation a partir de Simulink ou Arduino C pour la commande MLI, et d'autre matériel comme le capteur de courant, une source continue qui remplace la PàC vue de la non disponibilité au sein du laboratoire des energies renouvelables.

III.2.2.1. Cahier de charge de convertisseur « BOOST » :

Le cahier de charge des paramètres utilisé pour la réalisation pratique de ce convertisseur est résumé dans le tableau (III.1) qui précise les différents composants du circuit de puissance de convertisseur «BOOST» avec leur caractéristiques.

La figure (III.7) montre le circuit de puissance théorique et réelle de convertisseur «BOOST».

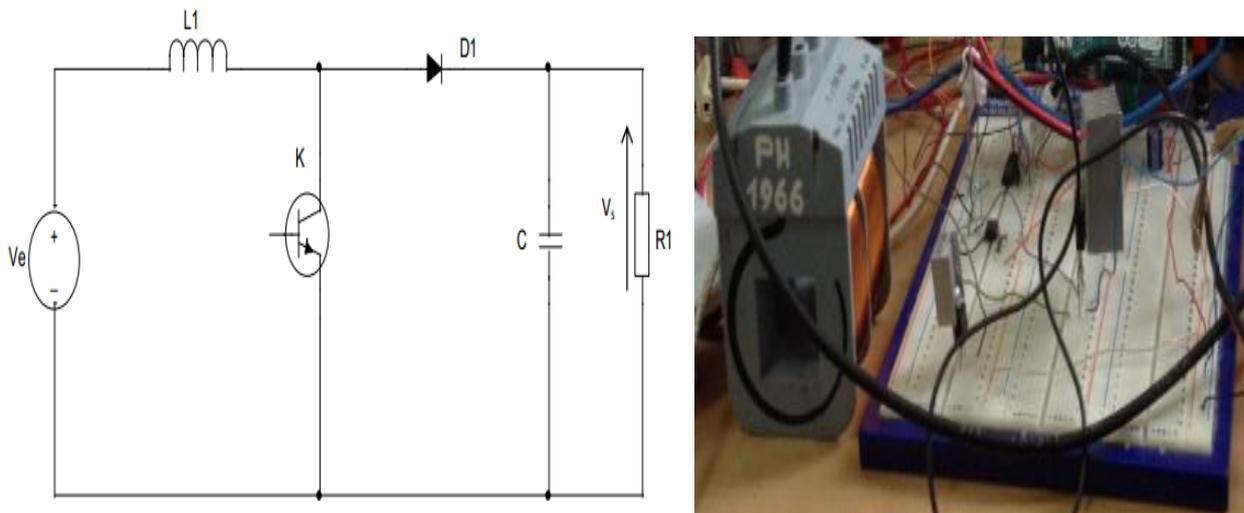


Figure III.7 : Circuit de puissance convertisseur « BOOST ».

V_{entrée}	12 V
V_{sortie}	14.5 V
Rapport cyclique	0.57
IJBT transistor	BUP314
Inductance L₁	9 mH ; I < 2 A ; R _{int} =2.5 Ω
Inductance L_{ch}	0.2 H ; I < 1.5 A ; R _{int} =10 Ω ; U < 250 V
Condensateur	63 V ; 100 μF ; 85°C
Résistance R_{ch}	11.7 Ω
Diode	MR 506

Tableau III.1 : Cahier de charge d'un convertisseur « BOOST ».

III.2.2.2. Essai avec la carte Arduino pour charge résistive pure :

La forme d'onde de la tension de charge représentée à la figure (III.8) et le signal de commande délivré par la carte de commande Arduino, la tension de charge atteindre une valeur moyen de $V_{ch(moy)} = 14.5 \text{ V}$, une ondulation de tension avec une valeur minimal de $V_{ch(min)} = 10 \text{ V}$ et valeur maximale de $V_{ch(max)} = 18.5 \text{ V}$, avec une fréquence de commutation de 500Hz.

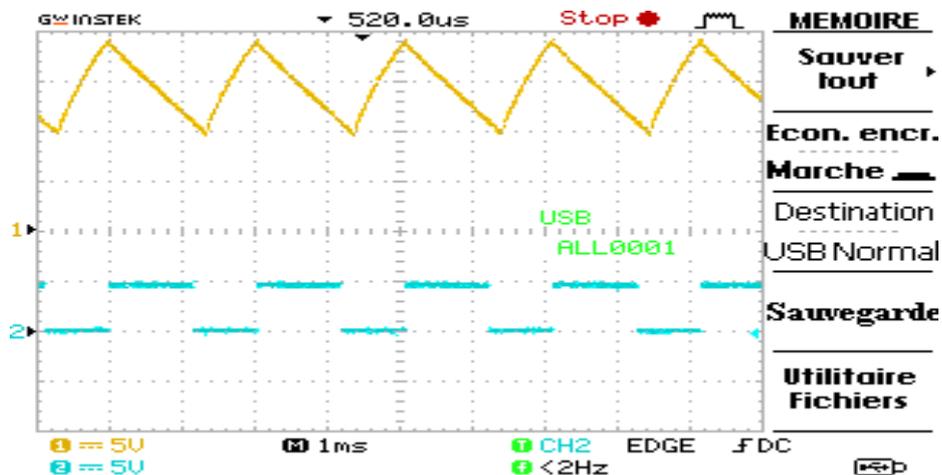


Figure III.8 : L'allure de V_{ch} et signal de commande.

La figure (III.9) représente la forme d'onde du courant de charge i_{ch} , le courant de charge atteindre une valeur moyen est environ de $i_{ch(moy)} = 0.8 \text{ A}$, une ondulation de courant avec une valeur minimal de $i_{ch(min)} = 0.7 \text{ A}$ et valeur maximale de $i_{ch(max)} = 1.1 \text{ A}$.

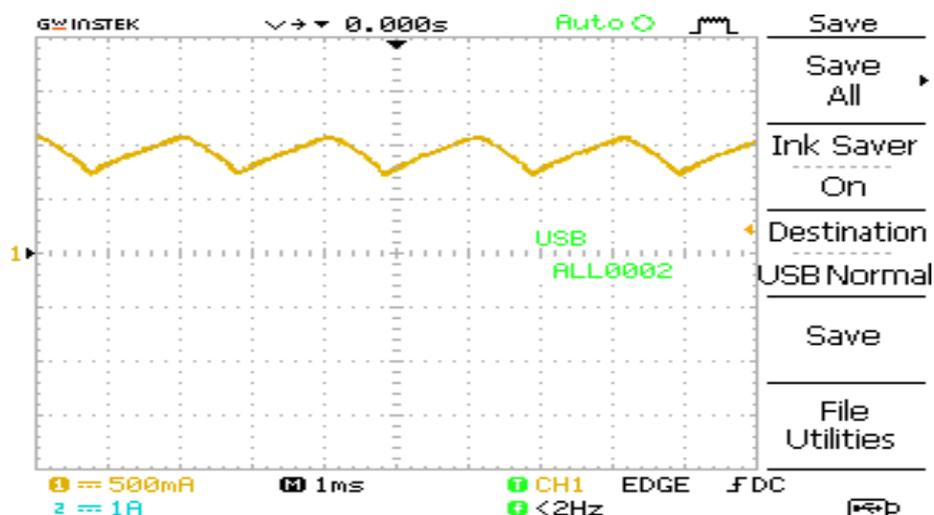
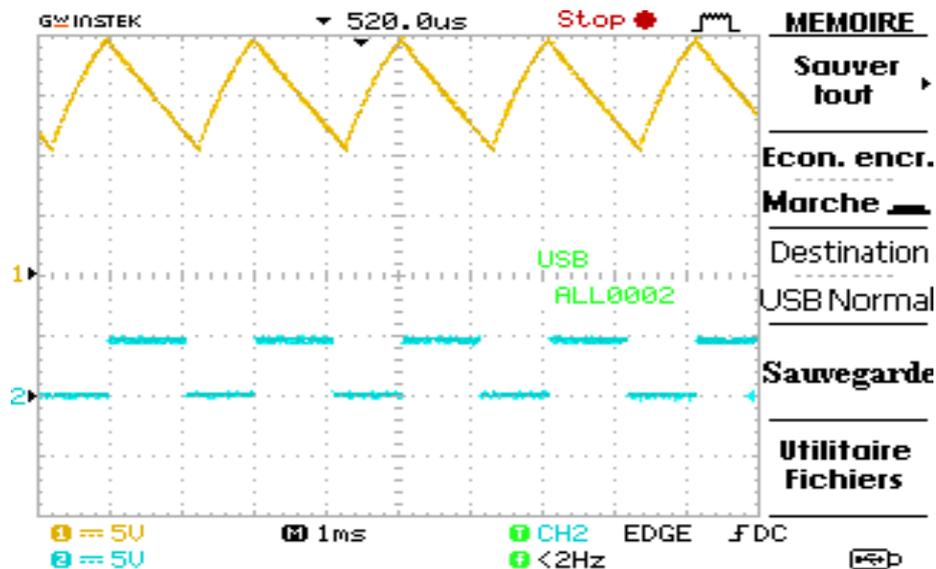


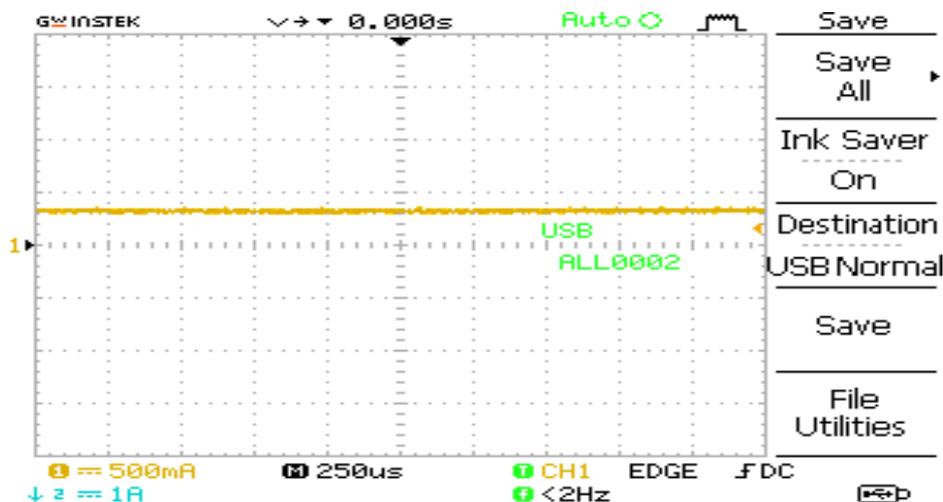
Figure III.9 : L'allure d' i_{ch} .

Les formes d'ondes de tension et courant de la charge pratiques sont presque identique a celle de simulation. Mais avec une petite perturbation par rapport au courbe théorique ces perturbation présente l'effet des pertes des composants électrique (IJB, le condensateur,etc...).

III.2.2.3. Essai avec la carte Arduino pour charge R-L :

Figure III.10 : L'allure de V_{ch} et signal de commande.

La figure (III.11) représente la forme d'onde du courant de charge i_{ch} pour le cas d'un charge R-L. On observe que le courant est lisse et prend la valeur 0.35 A .

Figure III.11 : L'allure de i_{ch} .

On remarque d'après le graphe à partir de l'oscilloscope 2 que V_{ch} sont les mêmes dans le cas d'une charge résistive et le cas d'une charge R-L.

On observe que le courant i_{ch} dans le cas d'une charge résistive est ondulé, mais quand on ajoute une inductance à la charge R-L, le courant est sans ondulation. Il est lisse par rapport au cas d'une charge R.

III.3. Le convertisseur DC/DC « SEPIC » :

III.3.1. Réalisation expérimentale de convertisseur « SEPIC » :

La validation expérimentale de notre convertisseur « SEPIC » a été effectuée au niveau de laboratoire des énergies renouvelables Biskra, Le but de cette essai expérimentale est de vérifier le bon fonctionnement de ce convertisseur avec la carte de commande Arduino appliquées au convertisseur proposé à la figure (III.12).

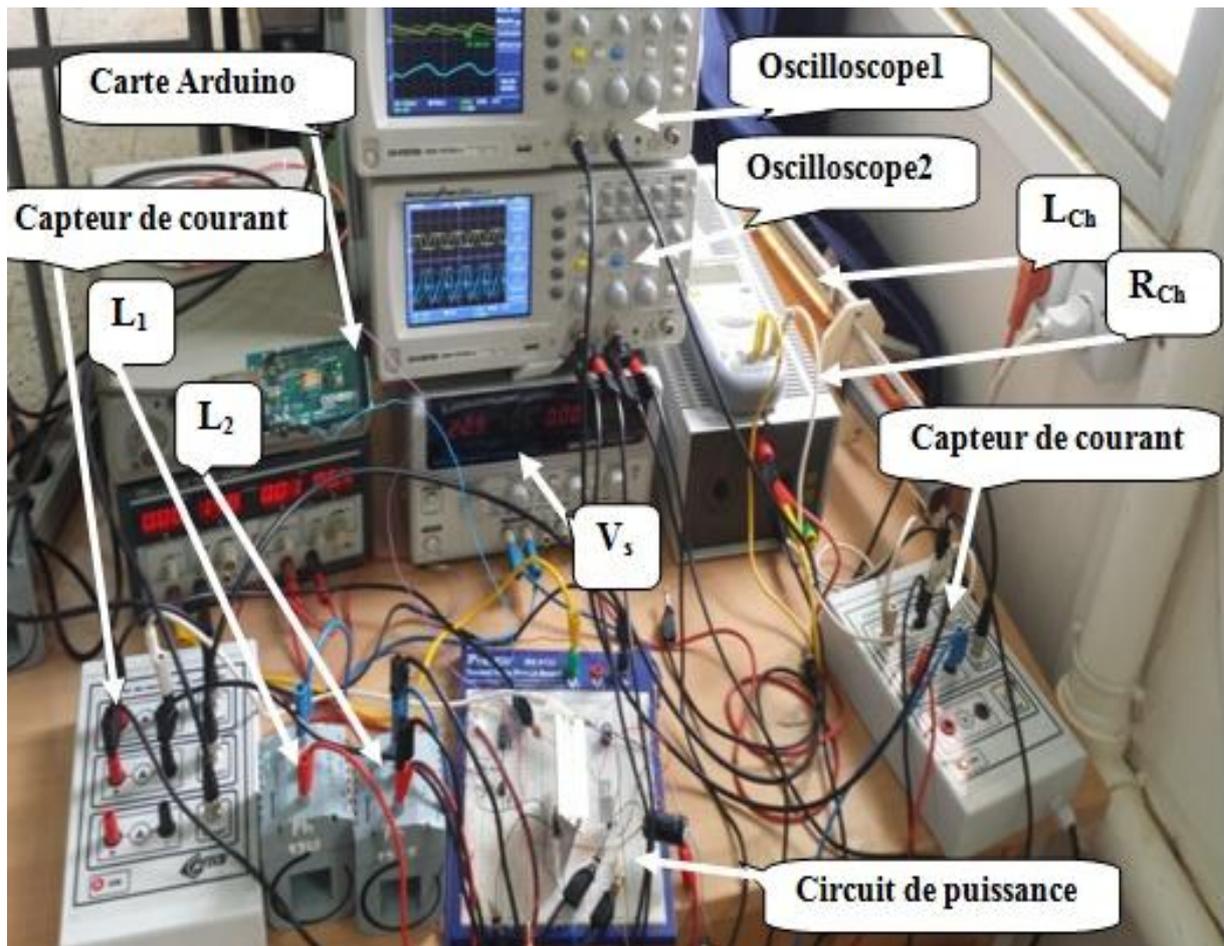


Figure III.12 : Montage de convertisseur « SEPIC ».

Pour générer les impulsions MLI qui commandent notre convertisseur DC/DC « SEPIC », la carte de commande Arduino est connectée à un PC d'alimentation et de compilation à partir d'un programme de Simulink ou Arduino C.

Ce convertisseur est fonctionné comme un « buck-boost », donc on peut varier la tension de sortie pour la charge que nous désirons avec la variation de rapport cyclique ou la variation de fréquence pour obtenir la tension satisfaisante.

III.3.2. Cahier de charge de convertisseur « SEPIC » :

Le cahier de charge des paramètres utilisé pour la réalisation pratique de ce convertisseur est résumé dans le tableau (III.1) qui précise les différents composants du circuit de puissance d'un convertisseur «SEPIC» avec leur caractéristiques.

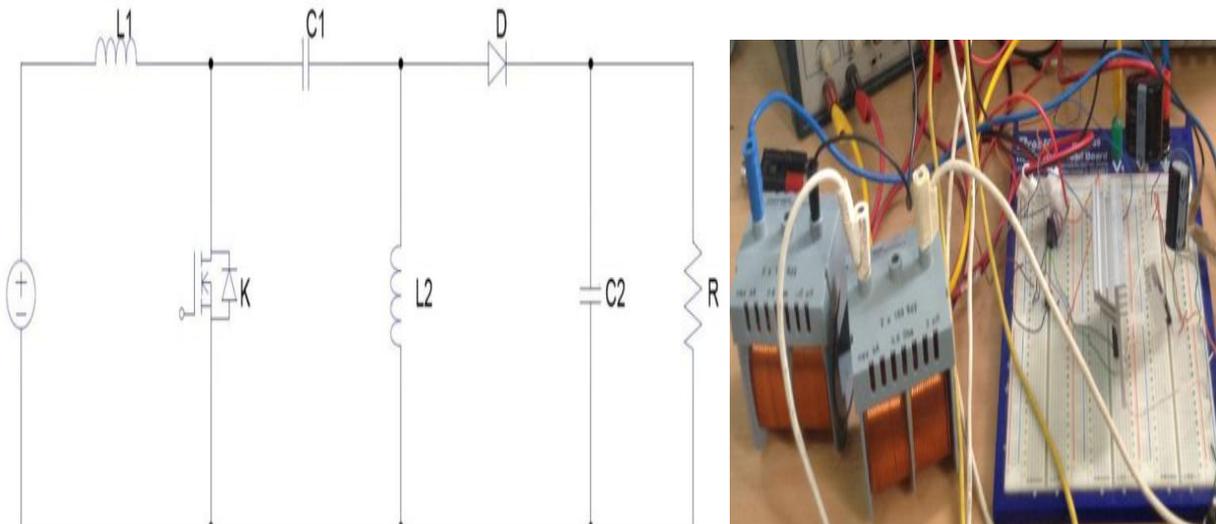


Figure III.13 : Circuit de puissance de convertisseur « SEPIC ».

$V_{\text{entrée}}$	14 V
V_{sortie}	0-17 V
Rapport cyclique	0-1+
IJBT transistor	BUP314
Inductance L_1	2 mH ; $I < 4 \text{ A}$; $R_{\text{int}}=0.8 \Omega$
inductance L_2	2 mH ; $I < 4 \text{ A}$; $R_{\text{int}}=0.8 \Omega$
Inductance L_{ch}	0.2 H ; $I < 1.5 \text{ A}$; $R_{\text{int}}=10 \Omega$; $U < 250 \text{ V}$
Condensateur C_1	400 V ; 330 μF ; 85°C
Condensateur C_2	63 V ; 100 μF ; 85°C
Résistance R_{ch}	11.7 Ω
Diode	MR 506

Tableau III.2 : Cahier de charge d'un convertisseur « SEPIC ».

La forme d'onde de la tension de charge représentée à la figure (III.14) et le signal de commande délivré par la carte de commande Arduino, la tension de charge atteindre une valeur moyen de $V_{ch(moy)} = 14.5$, une ondulation de tension avec une valeur minimal de $V_{ch(min)} = 12$ V et valeur maximale de $V_{ch(max)} = 18.5$ V, avec une fréquence de commutation de 500Hz.

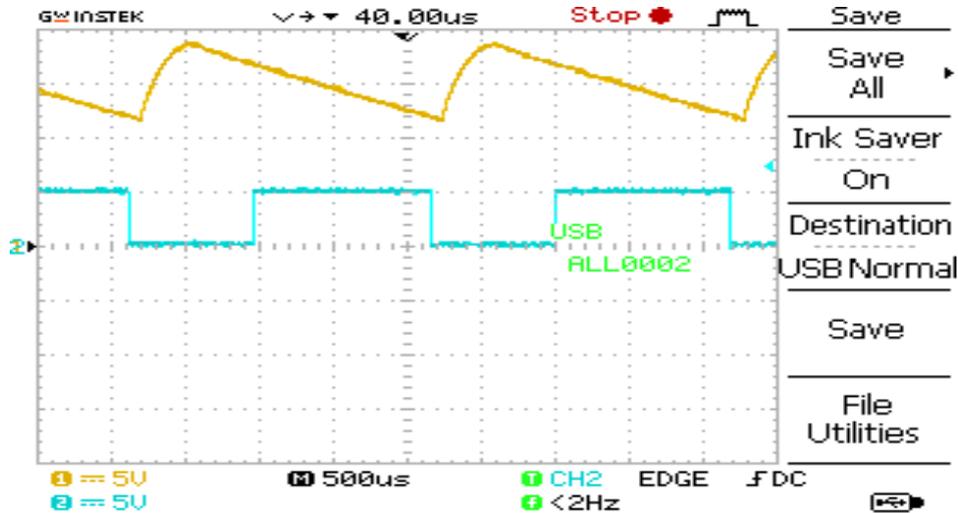


Figure III.14 : L'allure de V_{Ch} et signal de commande.

On constate que la figure (III.15) ci-dessous, pour V_Q le signale de commutation de IJBT est carré mais il y'a une petite perturbation c'est l'effet des pertes par commutation, et pour la tension V_{L1} la forme est presque le même avec la théorique parce que ne s'annule pas est la forme d'onde positive mais il ya des perturbations dans la phase de fermeture de IJBT.

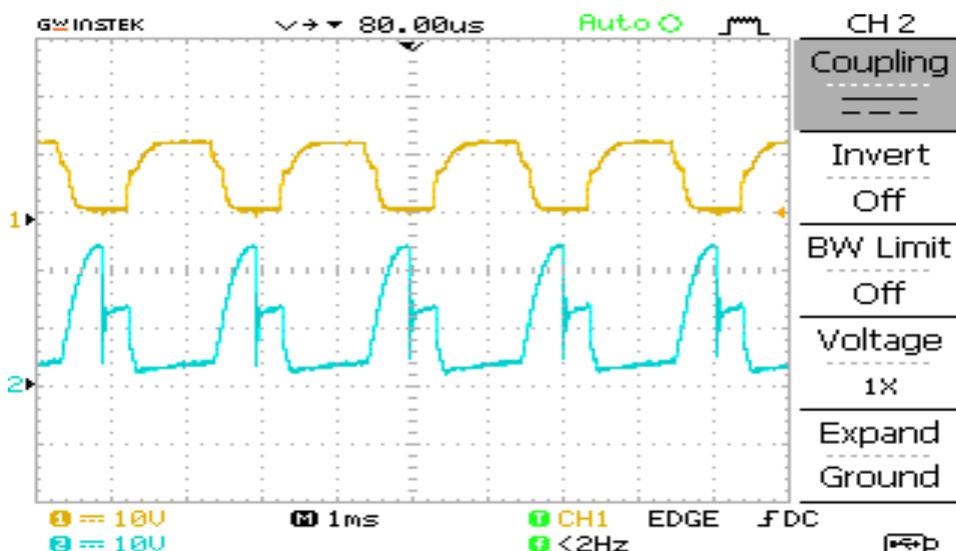


Figure III.15 : Les allures de V_Q et V_{L1} .

Dans la figure (III.16) ci-dessous, pour la tension V_{L2} la forme est presque le même avec la théorique parce ci contre dans l'inductance L_1 , la forme d'onde de V_{L2} prend des valeurs positive et négative avec des perturbations dans la phase de fermeture de IGBT.

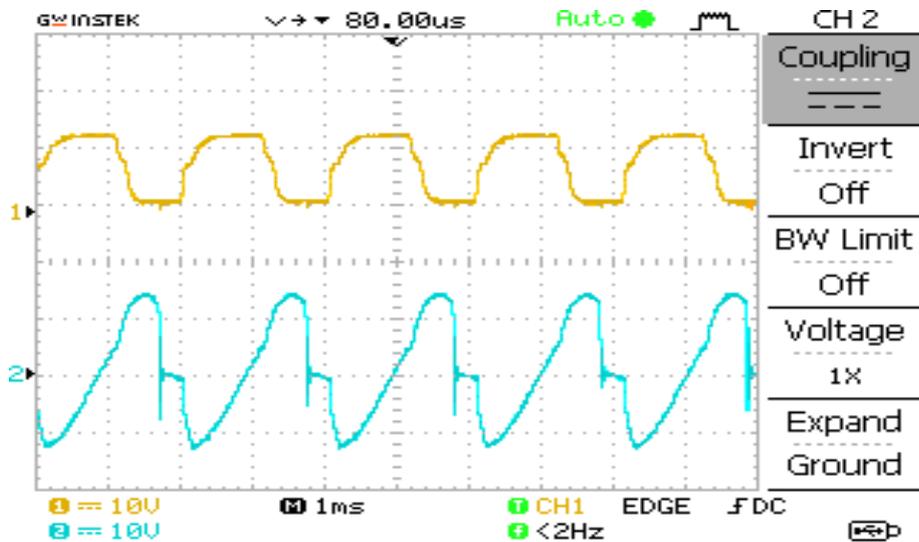


Figure III.16 : Les allures de V_Q et V_{L2} .

Les courant I_{L1} et I_{L2} dans la figure (III.17) sont identiques de point de vue de forme d'allures. Les résultats sont similaires que la théorie présenté dans le deuxième chapitre figure(II.9). L'allure de courant I_{L1} a la même forme que le courant d'entré et courant I_{L2} c'est l' image le courant de sortie, bien sur des oscillation apparaitraient dans le cas de pratique.

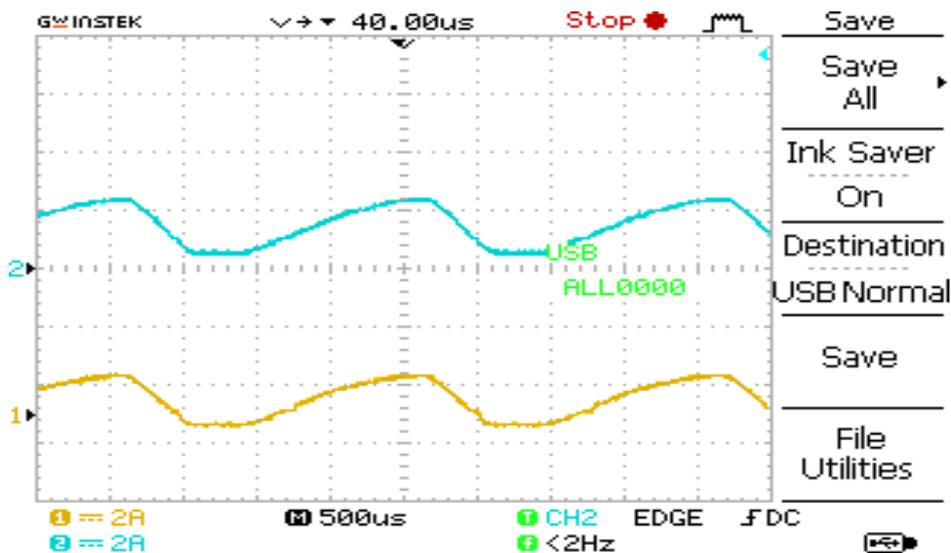


Figure III.17 : Les allures d' I_{L1} et I_{L2} .

La figure (III.18) montre que la tension V_{ch} et V_{C2} sont presque les mêmes formes d'onde avec des valeurs proche. Mais V_{ch} est supérieur un peu à V_{C2} c'est l'effet capacitive de condensateur C_2 .

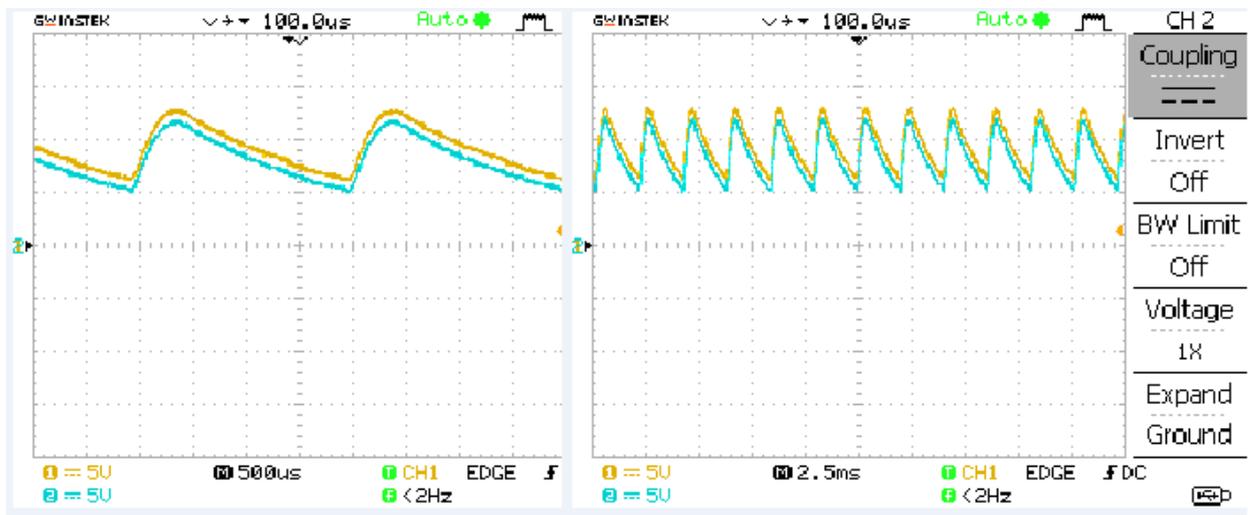


Figure III.18 : les allures de V_{ch} et V_{C2} .

Dans les figures (III.19) et (III.20) ci-dessous, la cohérence entre les résultats mesurés et l'approche théorique sont relativement bonne.

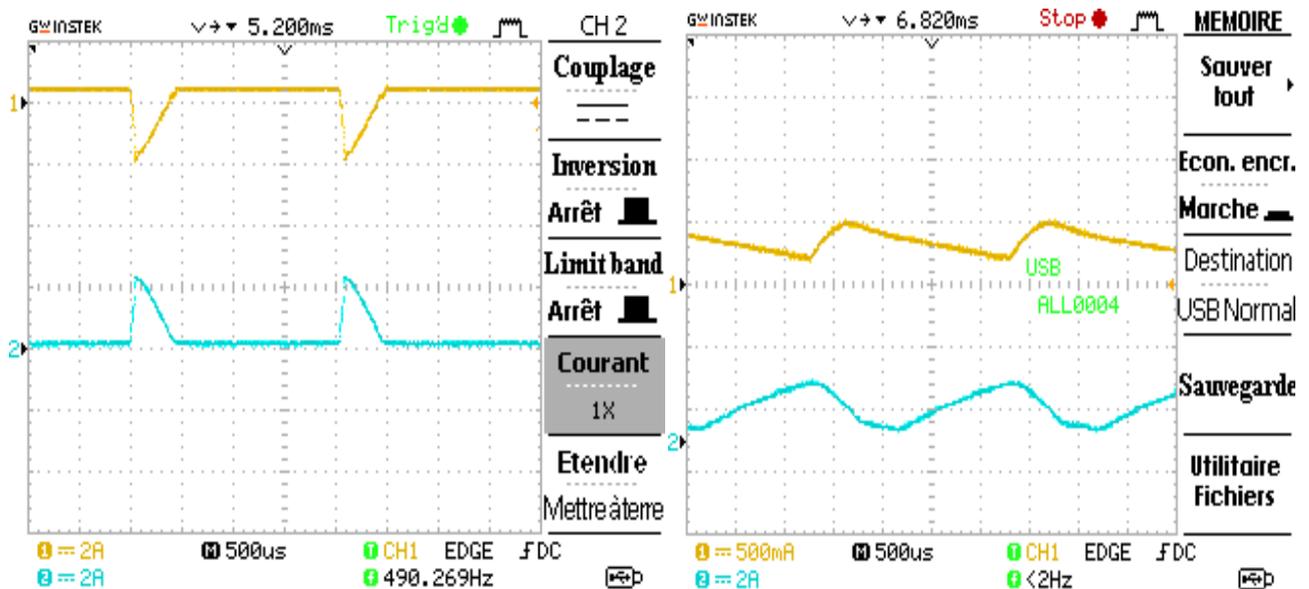


Figure III.19 : les allures de I_{C2} et I_D .

Figure III.20 : les allures de I_{Ch} et I_{L2}

III.4. Conclusion :

Le but est de réaliser notre contribution expérimentale, le bon fonctionnement de ces convertisseurs avec la carte de commande Arduino appliquées au convertisseur proposé. Une source continue limitée à 3 A, a été utilisée, vu la non disponibilité d'une PàC au sein du laboratoire, Cette source a été réglée pour une tension variable de 10 V à 12 V, qui nous donne a la sortie de convertisseur jusqu'à 17 V. Mais cette valeur peut être commandé et ajustée de 1 V jusqu'à 17 V par le convertisseur « SEPIC ». Ce dernier peut fonctionnée comme un abaisseur et un élévateur, ce qui nous permet d'alimenter une charge variable ou une batterie.

Chapitre IV

**La commande par la
carte Arduino**

IV.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent on a présenté les résultats de simulation et la validation expérimentale de nos convertisseurs « BOOST » et « SEPIC » commandés avec la carte Arduino.

Dans ce chapitre on va présenter le circuit de commande qui est la carte Arduino et le circuit d'isolation qui a le rôle d'isolation entre le circuit de commande et le circuit de puissance comme montre les figures (IV.1) et (IV.2). Le circuit d'isolation est constitué d'un circuit intégré et un optocoupleur et des résistances pour la protection.

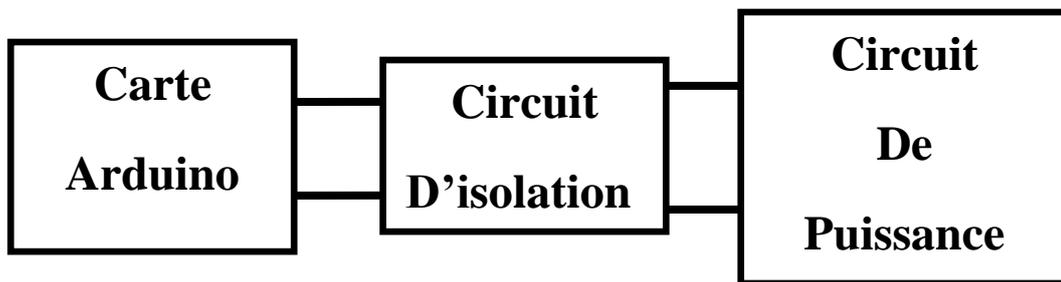


Figure IV.1 : Schéma synoptique des circuits de montage réalisé.

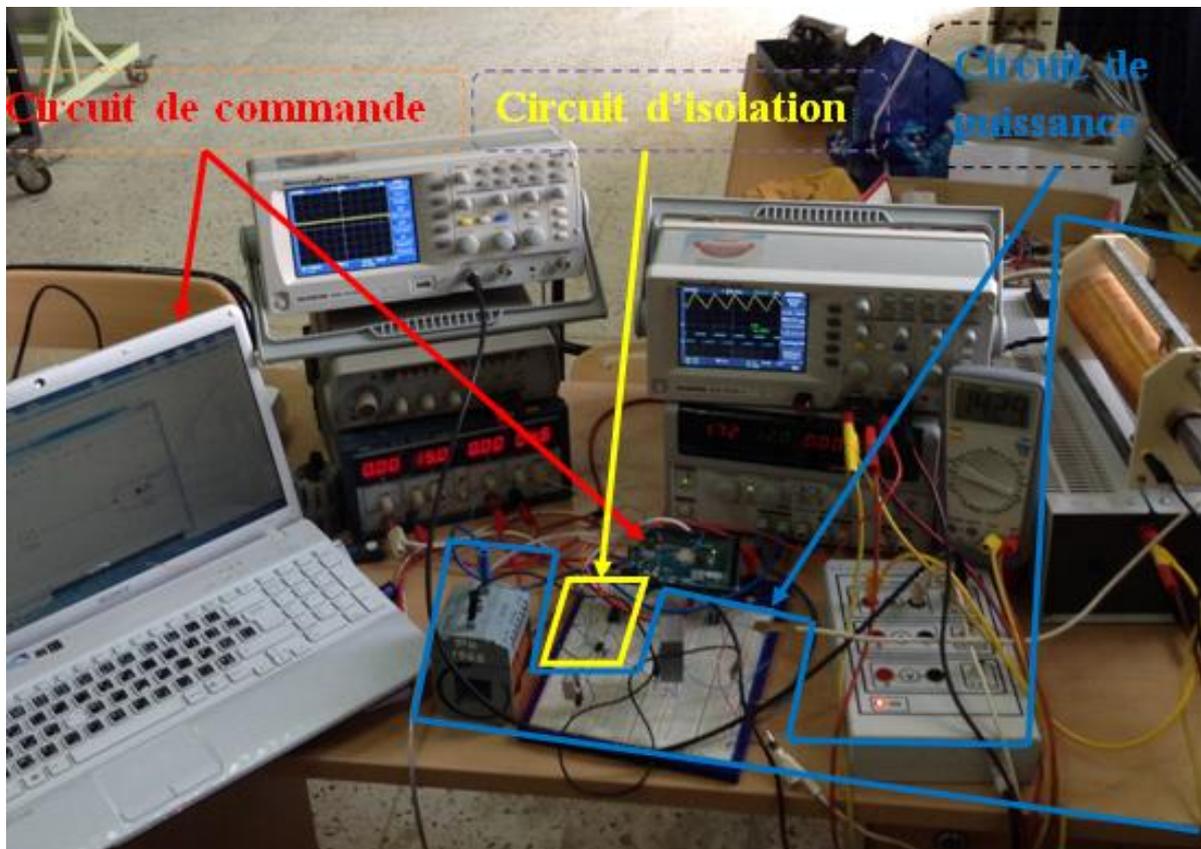


Figure IV.2 : Schéma réelle des circuits de montage réalisé.

IV.2.1. La carte arduino :

Arduino, son récent synonyme Genuino [24], sont des cartes matériellement libres sur lesquelles se trouve un microcontrôleur (d'architecture AtmelAVR comme par exemple l'Atmega328p). Les schémas de ces cartes sont publiés en licence libre, cependant, certains composants, comme le microcontrôleur par exemple, ne sont pas en licence libre.

Le microcontrôleur peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques - éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, de l'informatique embarquée, etc.

C'est une plate-forme basée sur une interface entrée/sortie simple.

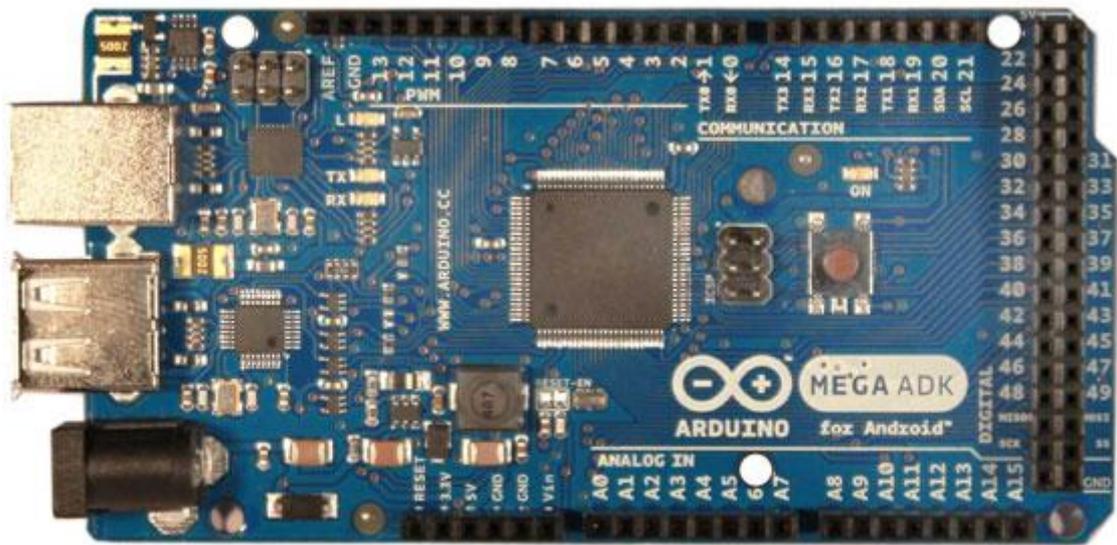


Figure IV.3 : La carte arduino ATMEGA2560.

Dans l'arduino, les noms des broches ont été simplifiés, la notion traditionnelle de ports d'entrées-sorties (port A, port B, etc.) a été remplacée par des numéros. La numérotation est simple et logique.

Une carte de type Uno offre 14 E/S numériques et 6 entrées analogiques. Les 14 E/S numériques sont câblées sur deux connecteurs nommés Digital (PWM) sur un côté de la carte, les 6 analogiques sur un connecteur en face, nommé Analog in. Aligné avec ce connecteur, on trouve un quatrième connecteur nommé Power qui comporte également le signal Reset.

Pourquoi les connecteurs des E/S numériques portent-ils la mention PWM ? Eh bien, les broches sur la carte marquées par un dièse (« # », parfois aussi par un tilde « ~ ») sont capables de fournir des signaux à modulation à largeur d'impulsion MLI (PWM en anglais). Elles sont balisées car, dans Arduino, elles servent comme sorties analogiques. Leur nombre dépend du micro, l'ATmega8 n'en a que trois (E/S 9 à 11), l'ATmega168 et l'ATmega328 en possèdent six (E/S 3, 5, 6, 9 à 11).

Pour les cartes de type Mega équipées de micros avec plus de broches que l'ATmega8/168/328, la numérotation des E/S est différente car les broches ont été regroupées sur des connecteurs par fonction. Ainsi, une telle carte dispose de connecteurs Power, Analog in, Digital, Communication et PWM. Le connecteur Digital est à double rangée.

Au total, une carte Mega 2560 offre 70 E/S numériques, découpées en 32 E/S numériques (Digital), 16 entrées analogiques (Analog in), 15 sorties MLI (PWM) et 10 broches réservées à la Communication [25].

IV.2.2. Les avantages de la carte Arduino:

- Pas cher !
- Environnement de programmation clair et simple.
- Multiplateforme : tourne sous Windows, Macintosh et Linux.
- Nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.
- Logiciel et matériel open source et extensible.
- Nombreux conseils, tutoriaux et exemples en ligne (forums, site perso etc...)
- Existence de « shield » (boucliers en français) : ce sont des cartes supplémentaires qui se connectent sur le module Arduino pour augmenter les possibilités comme par exemple : afficheur graphique couleur, interface ethernet, GPS, etc.

Par sa simplicité d'utilisation, Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électronique industrielle et embarquée, le modélisme, la domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain ou le spectacle.

IV.2.3. Les méthodes de programmé la carte Arduino pour la commande MLI (PWM) :

Il ya deux méthodes pour programmer la carte Arduino par la commande MLI (PWM) :

IV.2.3.1. MLI (PWM) avec Simulink :

Différent type de block pour injecté un signal MLI (PWM), La figure (IV.4) montre de la bibliothèque de la carte Arduino dans Matlab 2013 avec des blocs qui générè le signale MLI (PWM) et le rapport cyclique qui est variée de 0% à 100% mais avec la carte arduino le rapport est variée de 0 à 255 donc de 0 → 0% et 255→100%.

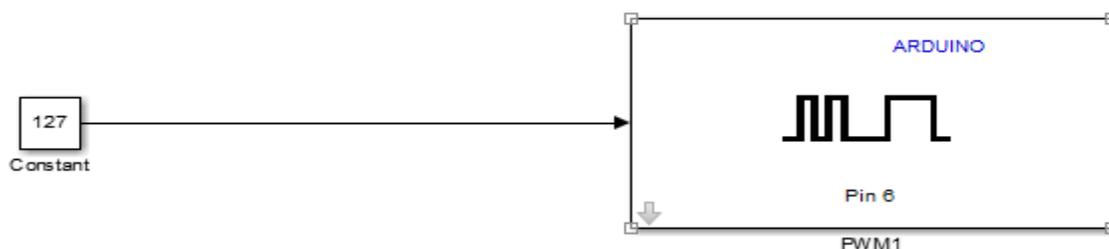


Figure IV.4 : Schéma bloc 1 d'un signal MLI (PWM).

Ou :

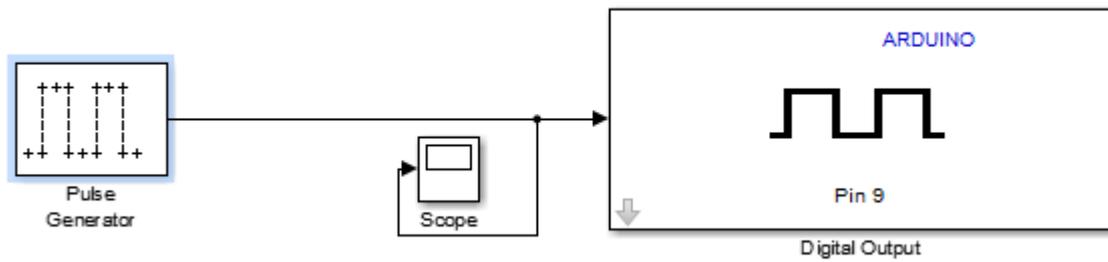


Figure IV.5 : Schéma bloc 2 d'un signal MLI (PWM).

IV.2.3.2. MLI (PWM) avec programmation C/C++:

Le programme suivant montre les instructions pour la commande MLI (PWM) par le programme Arduino1.6.6 :

```
const int pwmPin = 11;

int val;

int potpin=0;

void setup() {
  TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0x03 ;
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
}

void loop() {
  val = analogRead(potpin);
  val = map(val, 0, 1023, 0, 255);
  analogWrite(pwmPin,val);
}
```

IV.2.3.3. Variation de la fréquence par la carte Arduino « UNO » :

Pour la variation de la fréquence a partir programmation C.

Il y'a des méthodes à suivre :

Par exemple ce programme est donné la fréquence =3906 Hz.

Par la suite le programme suivant génère un fréquence de 3906 Hz :

```
const int pwmPin = 9;

int val;

int potpin=0;

void setup() {
  TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 0x03;
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
}

void loop() {
  val = analogRead(potpin);
  val = map(val, 0, 1023, 0, 255);
  analogWrite(pwmPin, val);
}
```

Si on veut changer la fréquence on à suivre les étapes :

- ° La fréquence de base pour les pins pwmpins 3, 9, 10, 11 est 31250 Hz.
- ° La fréquence de base pour les pwmpins 5 et 6 est 62500 Hz.
- * Le diviseur pour les pwmpins 5, 6, 9, 10 sont : 1, 8, 64, 256, 1024.
- * Le diviseur pour les pwmpins 3 et 11 sont : 1, 8, 32, 64, 256, 1024.

Pour l'exemple précédent en utilise le pwmpin 9 qui ai la base de fréquence 31250 Hz

Avec l'instruction `TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 0x03;`

⇒ $(31250/8)=3906$ Hz.

Les Tableaux (IV.1), (IV.2) et (IV.3) donnent chaque instruction pour les pwmpins :

- Pour les pwmpins 5 et 6 est `TCCR0B = TCCR0B & 0b11111000 | mode;`

Case	1	8	64	256	1024
mode	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05
Fréquence(Hz)	62500	7812	970	255	62

Tableau IV.1 : La fréquence à partir les pwmpins 5 et 6.

- Pour les pwmpins 9 et 10 est : $TCCR1B = TCCR1B \& 0b11111000 | mode;$

Case	1	8	64	256	1024
mode	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05
Fréquence(Hz)	31250	3906	488	122	31

Tableau IV.2 : La fréquence à partir les pwmpins 9 et 10.

- Pour les pwmpins 3 et 11 est $TCCR2B = TCCR2B \& 0b11111000 | mode;$

Case	1	8	32	64	128	256	1024
mode	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06	0x07
Fréquence(Hz)	31250	3906	976	488	244	122	31

Tableau IV.3 : La fréquence à partir les pwmpins 3 et 11.

A partir de ces tableaux et ces instructions on peut changer la fréquence de signal MLI(PWM) avec des différentes valeurs.

IV.2.3.4. Variation de rapport cyclique :

Le rapport cyclique est varié à partir de potentiomètre de valeur de 10 kΩ comme dans notre travaille a partir d'un programme C ou des blocs simulink.

Potentiomètre a trois bornes, Deux borne reliés a la masse (GND) et Vcc et l'autre borne a l'entrée analogique 0 (int potpin=0 ;) comme dans le programme de l'exemple précédent.

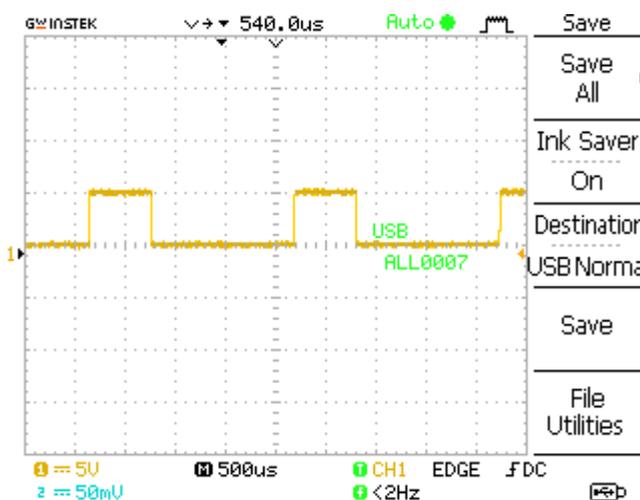


Figure IV.6.a : Rapport cyclique=30%.

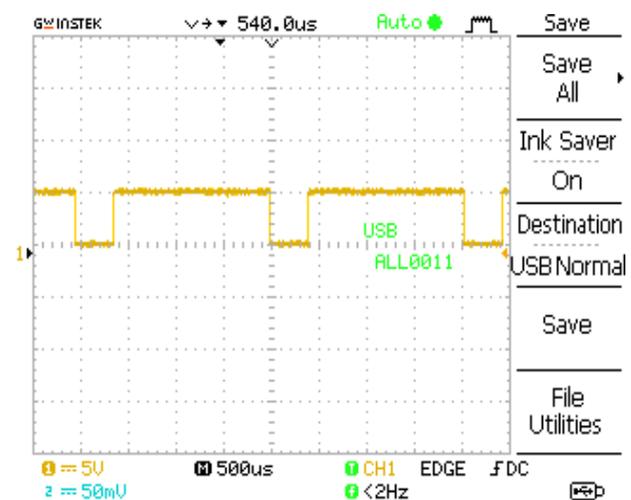


Figure IV.6.b : Rapport cyclique=80%.

IV.3. Circuit d'isolation :

La carte Arduino est sensible à tout genre de perturbations extérieures, elle est nécessaire de prévoir un circuit assurant la fonction d'isolation entre la carte de commande et le circuit extérieur. Notre choix s'est porté sur l'optocoupleur de la série 4N25 et le circuit TTL7400 comme il montre la figure (IV.7).

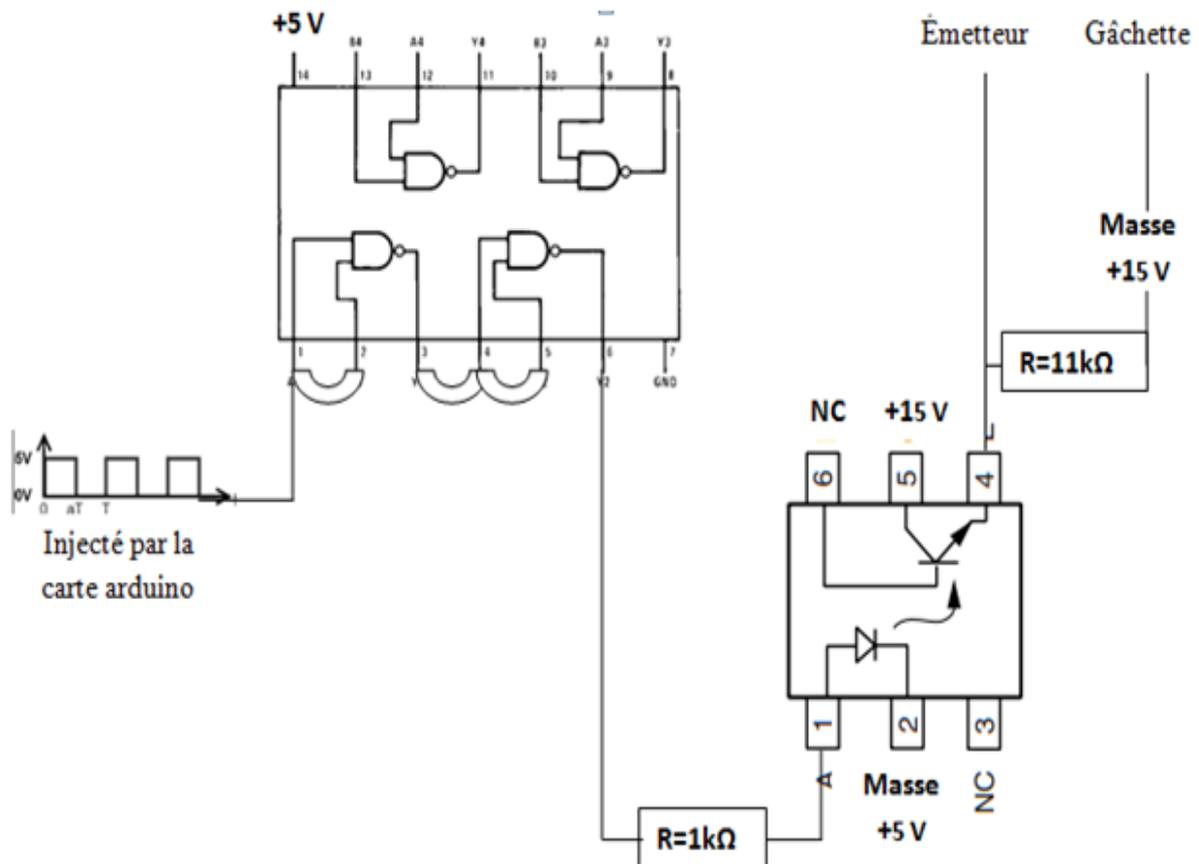


Figure IV.7 : Circuits d'isolation entre le circuit de puissance et le circuit de commande.

IV.3.1. L'optocoupleur 4N25 :

Il réalise une conversion «énergie électrique » en «énergie électrique ».

C'est un dispositif d'isolement qui permet la transmission de niveaux électrique non galvanique.

La tension d'isolement entre les deux parties du circuit peut être de l'ordre de quelque milliers de volts (ex : 1500 V pour un TIL111, 2500 V pour un TIL114, 3550 V pour le 4N35). Il est constitué d'une diode électroluminescente (LED) et d'un phototransistor intégrés dans le même boîtier comme il montre la figure (IV.8).

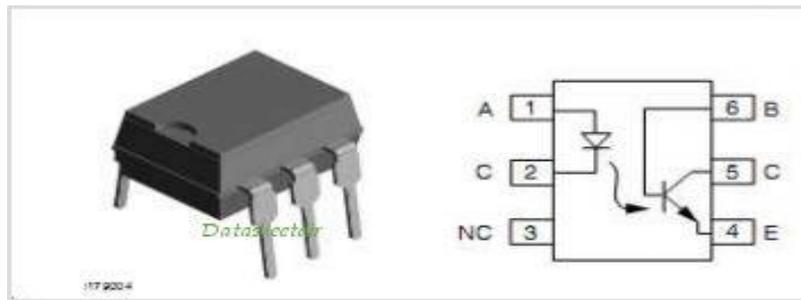


Figure IV.8: Schéma représentatif d'un optocoupleur.

IV.3.2. Le circuit intégré TTL7400 :

La figure (IV.9) représente un circuit intégré TTL7400 qui fait l'isolation entre la carte Arduino et l'optocoupleur.

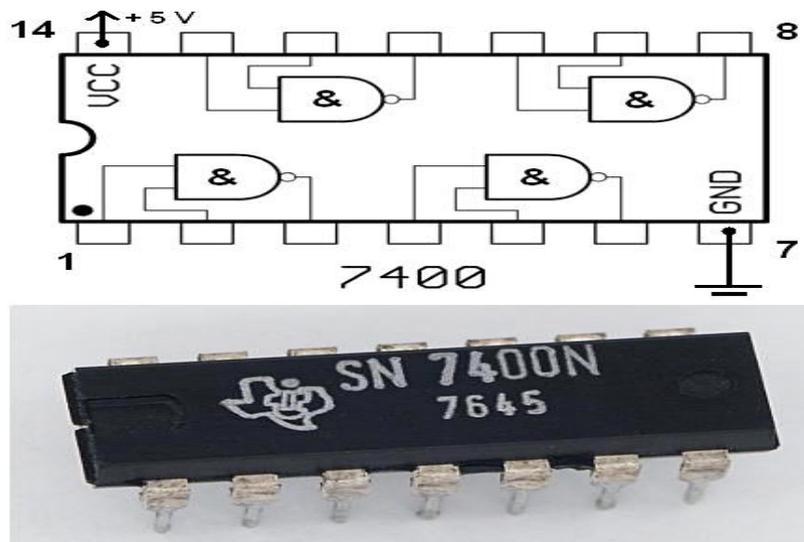


Figure IV.9 : Schéma représentatif d'un circuit intégré TTL7400.

IV.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une partie assez importante de notre travail, «Arduino».

Ce dispositif magique ou opérationnel qui nous permet de réaliser plusieurs aides, l'aide principale permet de réaliser un circuit de commande spéciale, simple et avec une bonne performance. Un circuit d'isolation a été réalisé et intercalé entre le circuit de commande et le circuit de puissance pour protéger la carte Arduino en cas de court-circuit.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons étudié et réalisé un système de PàC avec deux convertisseurs DC/DC le première est « BOOST » pour élevée la tension faible de PàC et le deuxième est « SEPIC » pour délivré la tension convenable pour la charge. Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur les piles à combustibles spécialement PEMFC, après ça en étudierons les convertisseurs proposé avec leur dimensionnement, par suite on a fait une simulation et la validation expérimentale de deux convertisseurs DC/DC a été effectué.

Après la réalisation pratique, il est important de noter que la mise en pratique des études théoriques s'avère une étape très difficile, il n'est pas évident d'avoir une réalisation qui marche dans la première fois, c'est difficile de détecter la source du problème, des choses que nous avons constatée au cours de notre étude pratique, plusieurs phénomènes qui apparaissent dans la réalité ne sont pas pris en considération.

Nous avons vue au cours de cette période, approfondir nos connaissances dans le domaine des convertisseurs DC/DC, les piles à combustible, les cartes Arduino ainsi que dans le domaine des composants de puissance en général. Cela apparait comme une bonne base qui nous permet d'envisager une suite de ces travaux.

Perspectives de recherche :

Certains développements de ce travail peuvent être envisagés pour un futur proche dont nous citons :

- Évaluation d'un prototype expérimental avec une pile à combustible réelle.
- L'association en cascade des convertisseurs avec la PàC pour arrivée a un système complet.
- Réalisé une commande avec une boucle fermée.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] N. Romani, "Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformage Embarqué," Université Paris Sud-Paris XI, 2007.
- [2] H. Oman, "Fuel cells for "personal electricity"," Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, vol. 15, pp. 43-45, 2000.
- [3] F. Guillaume. Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [4] E. Freund and P. Lucchese, Hydrogen, the Post-oil Fuel. TECHNIP OPHRYS EDITIONS, 2012.
- [5] M. Bischoff, "Large stationary fuel cell systems: status and dynamic requirements," Journal of Power Sources, vol. 154, pp. 461-466, 2006.
- [6] M. A. Cropper, S. Geiger and D.M. Jollie, «Fuel cells: a survey of current developments," Journal of Power Sources, vol. 131, pp. 57-61, 2004.
- [7] H. Maker. Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et super condensateurs. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008
- [8] F. de Bruijn, "The current status of fuel cell technology for mobile and stationary applications," Green Chemistry, vol. 7, pp. 132-150, 2005.
- [9] J. Lachaiza. Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à combustible (PAC) destinés à la traction. Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [10] A. Saadi. Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [11] G. fontés. Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques. Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [12] D.B. Viet. Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.2006.
- [13] G. Hoogers, Fuel cell technology handbook: CRC press, 2002.

[14] J. Atkins, S. Savett, and S. Creager, "Large-scale current fluctuations in PEM fuel cells operating with reduced feed stream humidification," *Journal of Power Sources*, vol. 128, pp. 201-207, 2004.

[15] M. Ouzounidou, D. Ipsakis, S. Voutetakis, S. Papadopoulou, and P. Seferlis, "A combined methanol autothermal steam reforming and PEM fuel cell pilot plant unit: Experimental and simulation studies," *Energy*, vol. 34, pp. 1733-1743, 2009.

[16] R. Saadi. *Convertisseurs Basse Tension (42V, 540V); Application Source Hybride Utilisant Une Pile à Combustible*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.

[17] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, A. Djerdir, "Energy efficiency and fault tolerance comparison of DC/DC converters topologies for fuel cell electric vehicles," in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2013 IEEE, pp. 1-7, 2013.

[18] N.bouchabana, *Etude d'une nouvelle topologie Buck-boost appliquée à un MPPT*, Mémoire de magistère, Ecole Nationale polytechnique, Alger, Algérie ,2009.

[19] S.Ait-cheikh, *Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*, thèse de Doctorat d'état, école nationale polytechnique, Alger,Algerie,2007.

[20] Wei Gu, Dongbing Zhang, *Designing a SEPIC Converter* .National Semiconductor Application Note 1484, April 30, 2008.

[21] S. Zaguaoui, *Optimisation d'un générateur photovoltaïque avec une commande MPPT numérique*, Mémoire de Master, Ecole Nationale polytechnique, Alger, Algérie ,2013.

[22] Texas instrument, AN-1484 *Designing A SEPIC Converter*, Application Report SNVA168E–May2006–Revised April2013.

[23] C. Liu, A. Johnson, and J.-S. Lai, "A novel three-phase high-power soft-switched DC/DC converter for low-voltage fuel cell applications," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 1691-1697, 2005.

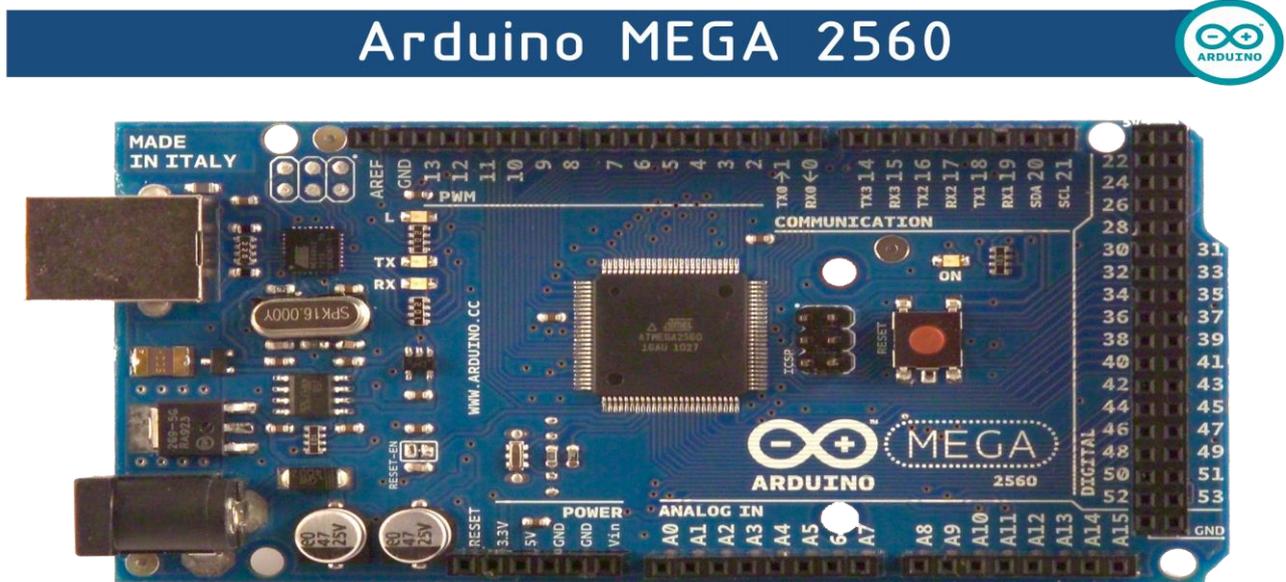
[24] <http://www.arduino.cc/en/Main/GenuinoBrand>

[25] C. Valens, *Maîtrisez les microcontrôleurs à l'aide d'Arduino*, Copyright Elektor International Media - ISBN 978-2-86661-190-3.

Annexes

Annexe A

A.1. La carte Arduino MEGA 2560 :



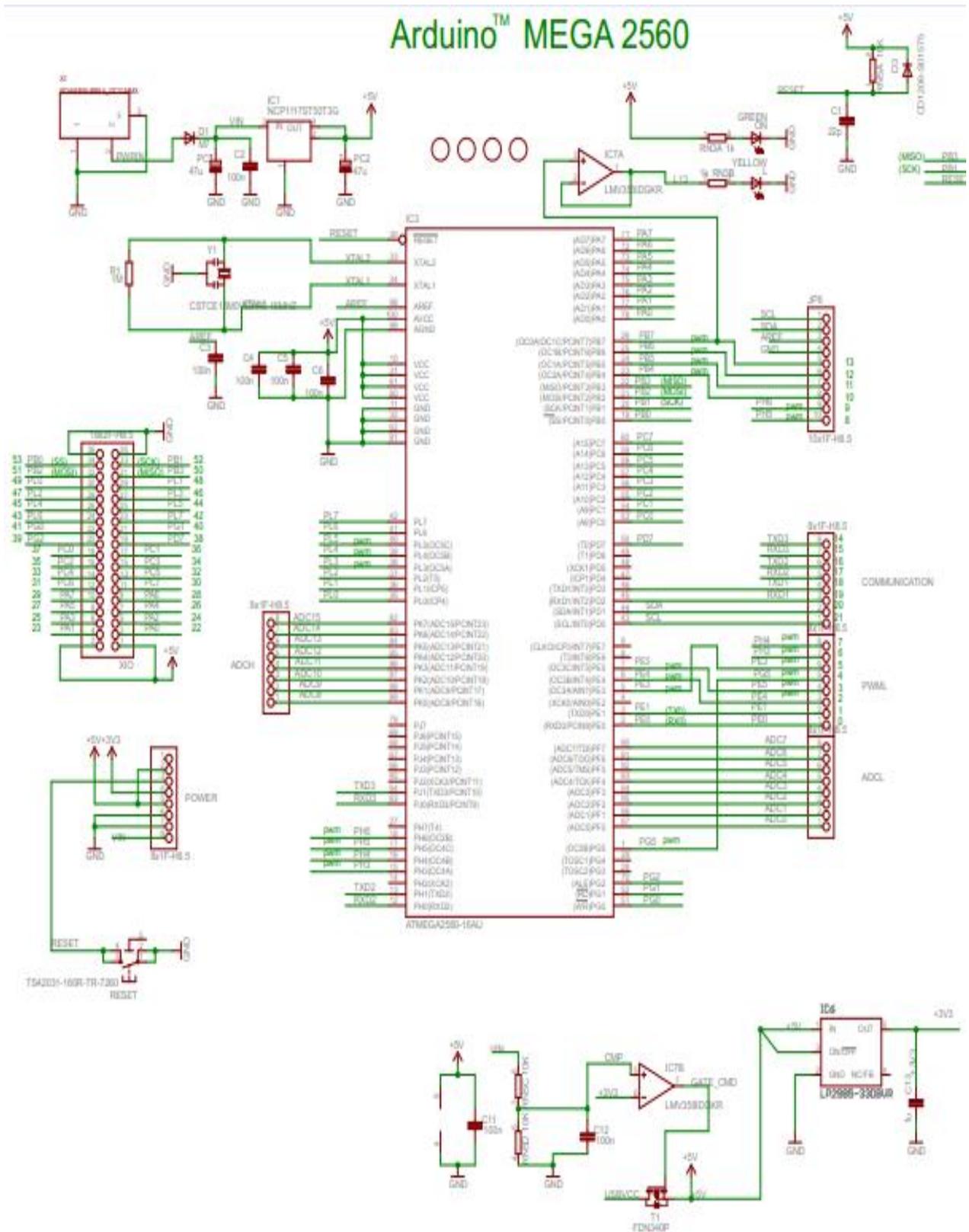
A.2. Caractéristiques de d'Arduino ATmega2560 :



Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40mA
DC Current for 3.3V Pin	50mA
Flash Memory	256KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

Tableau : Caractéristiques d'Arduino ATmega2560

A.3. Schéma détaillé de la carte Arduino MEGA 2560 :



Annexe B

B.1. Brochure d'IJBT BUP 314 :

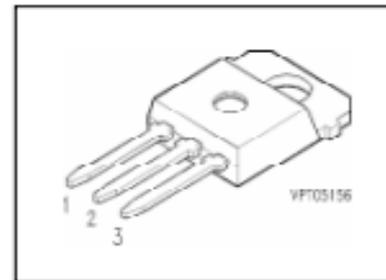
SIEMENS

BUP 314D

IGBT With Antiparallel Diode

Preliminary data

- Low forward voltage drop
- High switching speed
- Low tail current
- Latch-up free
- Including fast free-wheel diode



Pin 1	Pin 2	Pin 3
G	C	E

Type	V_{CE}	I_C	Package	Ordering Code
BUP 314D	1200V	42A	TO-218 AB	Q67040-A4226-A2

Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Values	Unit
Collector-emitter voltage	V_{CE}	1200	V
Collector-gate voltage	V_{CGR}	1200	
$R_{GE} = 20 \text{ k}\Omega$		± 20	
Gate-emitter voltage	V_{GE}	± 20	
DC collector current, (limited by bond wire)	I_C	42	A
$T_C = 60 \text{ }^\circ\text{C}$		33	
$T_C = 90 \text{ }^\circ\text{C}$			
Pulsed collector current, $t_p = 1 \text{ ms}$	$I_{C\text{puls}}$	84	
$T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$		66	
$T_C = 90 \text{ }^\circ\text{C}$			
Diode forward current	I_F	28	
$T_C = 90 \text{ }^\circ\text{C}$			
Pulsed diode current, $t_p = 1 \text{ ms}$	$I_{F\text{puls}}$	168	
$T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$			
Power dissipation	P_{tot}	300	W
$T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$			
Chip or operating temperature	T_j	-55 ... + 150	$^\circ\text{C}$
Storage temperature	T_{stg}	-55 ... + 150	

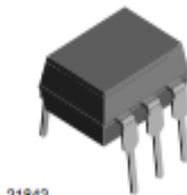
B.2. Brochure d'optocoupleur 4N25 :

4N25, 4N26, 4N27, 4N28

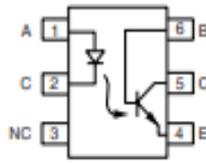
Vishay Semiconductors



Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection



21842



#770044

DESCRIPTION

The 4N25 family is an industry standard single channel phototransistor coupler. This family includes the 4N25, 4N26, 4N27, 4N28. Each optocoupler consists of gallium arsenide infrared LED and a silicon NPN phototransistor.

FEATURES

- Isolation test voltage 5000 V_{RMS}
- Interfaces with common logic families
- Input-output coupling capacitance < 0.5 pF
- Industry standard dual-in-line 6 pin package
- Compliant to RoHS directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC



RoHS
COMPLIANT

APPLICATIONS

- AC mains detection
- Reed relay driving
- Switch mode power supply feedback
- Telephone ring detection
- Logic ground isolation
- Logic coupling with high frequency noise rejection

AGENCY APPROVALS

- UL1577, file no. E52744
- BSI: EN 60065:2002, EN 60950:2000
- FIMKO: EN 60950, EN 60065, EN 60335

ORDER INFORMATION	
PART	REMARKS
4N25	CTR > 20 %, DIP-6
4N26	CTR > 20 %, DIP-6
4N27	CTR > 10 %, DIP-6
4N28	CTR > 10 %, DIP-6

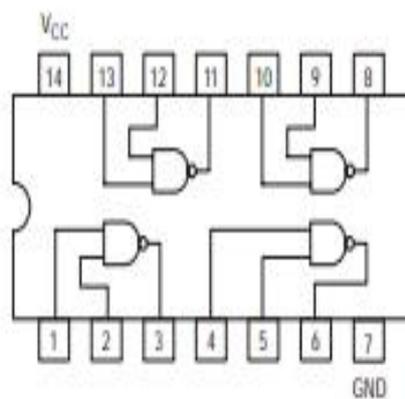
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT				
Reverse voltage		V _R	5	V
Forward current		I _F	60	mA
Surge current	t ≤ 10 μs	I _{FSM}	3	A
Power dissipation		P _{dis}	100	mW
OUTPUT				
Collector emitter breakdown voltage		V _{CEO}	70	V
Emitter base breakdown voltage		V _{EB0}	7	V
Collector current		I _C	50	mA
	t ≤ 1 ms	I _C	100	mA
Power dissipation		P _{dis}	150	mW

B.3. Brochure de circuit intégré SN74LS00 :

SN74LS00

Quad 2-Input NAND Gate

- ESD > 3500 Volts



GUARANTEED OPERATING RANGES

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
V_{CC}	Supply Voltage	4.75	5.0	5.25	V
T_A	Operating Ambient Temperature Range	0	25	70	°C
I_{OH}	Output Current – High			-0.4	mA
I_{OL}	Output Current – Low			8.0	mA

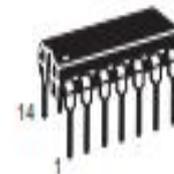


ON Semiconductor

Formerly a Division of Motorola

<http://onsemi.com>

**LOW
POWER
SCHOTTKY**



**PLASTIC
N SUFFIX
CASE 646**

Annexe C

C.1. Programme Matlab de dimensionnement d'un convertisseur « BOOST » :

% les paramètres pour calculés les éléments de puissance:

% 1. Entrée la tension : $V_{IN(min)}$ and $V_{IN(max)}$

% 2. la tension de sortie nominale: V_{OUT}

% 3. le courant maximale: $I_{OUT(max)}$

clc;

disp('BOOST CONVERTER CALCULATION')

Vin=input('enter the minimum input voltage:: ');

Vin1=input('enter the maximum input voltage:: ');

Vout=input('enter the output voltage:: ');

I=input('enter the maximum output current:: ');

fs=input('enter the switching frequency:: ');

% calculation of maximum switch current

n=0.9;

D=1-((Vin*n)/Vout); % duty cycle

di=.2*I*(Vout/Vin); % inductor ripple current

L=(Vin*(Vout-Vin1))/(di*fs*Vout); % inductor value

% dv=(I/(1-D))+(di/2);

dv=0.5;

C=I*D/(fs*dv); % output capacitor value

R=Vout/I;

disp('*****')

disp('DUTY CYCLE:::')

D=D*100;

D

disp('RIPPLE CURRENT:::')

di

disp('INDUCTOR VALUE:::')

L

disp('VOLTAGE RIPPLE:::')

dv

disp('CAPACITOR VALUE micro farad:::')

C=C;

C

R

disp('*****')

clear all

clc

C.2. Programme Matlab de dimensionnement d'un convertisseur « SEPIC » :

```
Vin=14;
Vout=17;
Iout=0.8;
f=500;

%on négligeant la chute de tension aux bornes de la diode
%rapport cyclique
alpha=Vout/(Vin+Vout)
%inductances
deltaIL=Iout*(Vout/Vin)*0.4
L1=(Vin/(deltaIL*f))*alpha
L2=(Vin/(deltaIL*f))*alpha
%courant maximal
IL1=(Iout*(Vout/Vin))*(1+(0.4/2))
IL2=Iout*(1+(0.4/2))
IC1=Iout*sqrt((Vout/Vin))
%condensateur
C1=0.000111 %c mon choix!!!!??
deltaVC1=(Iout*alpha)/(C1*f)
C2=(Iout*alpha)/f
%transistor doit etre supporter une tension
Vk=Vin+Vout
%transistor traverser par un courant crèt
Ikpeak=IL1+IL2
Ikrms=Iout*(sqrt((Vout+Vin)*(Vout)))/(Vin*Vin))
%Diode
IDpeak=Ikpeak
VD=Vin+Vout
```