

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PREUVE DE CONCEPT D'UN DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ÉNERGIE POUR
APPLICATIONS DANS DES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE

JEAN-NICOLAS MORIN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 2013

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

PREUVE DE CONCEPT D'UN DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ÉNERGIE POUR
APPLICATIONS DANS DES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE

présenté par : MORIN Jean-Nicolas

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BRAULT Jean-Jules, Ph.D., président

M. SIROIS Frédéric, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. APRIL Georges-Émile, M.Sc., membre et codirecteur de recherche

M. AUDET Yves, Ph.D., membre

*Ce mémoire est dédié à mes parents,
qui m'ont soutenu tout au long de mes études.*

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mes deux directeurs, Frédéric Sirois et Georges-Émile April, sans qui ce projet n'aurait pas pu se réaliser. Je les remercie également pour leur soutien et leurs précieux conseils tout au long de la réalisation de ce projet. Merci aussi à Monsieur Maurice Brisson de BBA, pour la bourse qui porte son nom et qui a contribué significativement au financement de mes études ainsi qu'à ma motivation à poursuivre le travail. Je voudrais également remercier les gens qui m'ont aidé ponctuellement pour divers aspects du projet. Entre autres Jean-Jules Brault et Sylvain Beaudin pour "debugger" la programmation du microcontrôleur, Nicolas Teyssedou, Nicholas Veerabadren et Julien Mandeville pour l'apprentissage de EagleCad et de la soudure de composantes. Je remercie enfin tous mes camarades du département d'énergie électrique avec qui j'ai passé ces trois années et qui ont contribué à faire de ce séjour à Polytechnique une expérience si agréable.

RÉSUMÉ

Ce mémoire traite d'un dispositif de stockage d'énergie utilisant des supercondensateurs. Ce dispositif, lorsque utilisé en plusieurs exemplaires commutés et reliés en série, permet de créer divers types de convertisseurs de puissance. L'usage de supercondensateurs dans le principe de fonctionnement de ces convertisseurs de puissance leur permet de combiner les fonctions de conversion de puissance et de stockage d'énergie dans un seul dispositif. L'objectif principal de ce mémoire est de démontrer la faisabilité du concept présenté. C'est-à-dire montrer que les modules individuels fonctionnent tel qu'anticipé, et qu'il est possible de réaliser des convertisseurs de puissance fonctionnels en utilisant plusieurs de ces modules.

Le principe de la double couche électrochimique, sur lequel repose le fonctionnement des supercondensateurs, permet à ces derniers d'accumuler substantiellement plus d'énergie que les condensateurs conventionnels. De plus, ils ont une densité de puissance supérieure à celle des batteries conventionnelles. Cela est dû au fait que le fonctionnement des batteries repose sur des réactions chimiques, un processus relativement lent.

Par contre, les supercondensateurs sont limités par la tension qu'ils peuvent atteindre, soit environ 2,7 V généralement. On doit alors en relier plusieurs en série afin d'obtenir des tensions plus élevées. Or, cela pose problème car la variabilité des capacités réelles d'un condensateur à un autre fera varier les tensions atteintes dans chacun d'eux. Il y a alors risque de dépasser les limites de tensions. Cependant, le principe de fonctionnement du dispositif dont il est question ici permet de gérer les tensions, ce qui élimine ce problème.

Le coeur du projet réside dans le module de puissance. Celui-ci est composé de supercondensateurs et des semiconducteurs servant d'interrupteurs. Le circuit repose sur le concept de supercondensateurs commutés, reliés en série. La commutation permet d'inclure ou de retirer individuellement tout supercondensateur de la série, ce qui fait varier la tension aux bornes de la série en conséquence. Les commutations sont commandées par un microcontrôleur. De plus, le design du dispositif retenu dans le cadre de cette recherche contient un circuit de commande et de protection.

Chacune des séries de supercondensateur constitue une "branche". Un convertisseur peut être réalisé en faisant fonctionner une ou plusieurs branches en parallèle, selon la topologie retenue. Les tests effectués pendant le projet ont porté sur une topologie à trois branches.

Dans ce type de convertisseur, il y a toujours une des branches qui est reliée à la borne d'entrée, une autre branche reliée à la borne de sortie, et la troisième sert de tampon pour éviter toute discontinuité de tension ainsi que de permettre qu'une lecture des tensions de chacun des supercondensateurs se fasse.

L'expérimentation a porté sur deux types de convertisseurs DC/DC à trois branches. L'un de ces convertisseurs utilisant des BJT comme commutateurs entre les branches et les bornes d'entrée et de sortie est bidirectionnel, alors qu'un autre design utilisant plutôt des diodes Schottky est unidirectionnel.

Les résultats montrent que ces deux types de convertisseurs fonctionnent tel qu'anticipé, bien que des faiblesses au niveau du circuit de test n'ont pas permis de les exploiter au maximum de leur capacité en courant et en puissance.

Ce genre de dispositif serait adapté à des applications qui nécessitent une conversion de puissance ainsi qu'une fonction de stockage d'énergie. Le lissage de la production d'électricité pour les éoliennes serait un candidat potentiel. La récupération d'énergie de freinage de véhicules électriques est également une application intéressante pour ce dispositif. Présentement, ces applications nécessitent une banque de condensateurs reliée au reste du circuit par un convertisseur de puissance. L'invention présentée dans ce mémoire permet de cumuler ces deux fonctions, conversion et stockage d'énergie, en un seul dispositif.

ABSTRACT

This dissertation presents an energy storage device which uses ultracapacitors. This device, when used in several series connected and commutated units enables the creation of different types of power converters. The use of ultracapacitors in those power converters allows them to combine the functions of power conversion and of energy storage in one single device. The main objective of this dissertation is to demonstrate the feasibility of the concept, which means showing that individual modules work as they are expected to, and that it is possible to make power converters by connecting several of these devices in series.

The electrochemical double layer concept, on which ultracapacitors rely, allows them to store much more energy than conventional capacitors. Ultracapacitors also have a much higher power density than conventional batteries. This is due to the fact that conventional batteries rely on chemical reactions, which is a relatively slow process.

On the other hand, the tension that ultracapacitors can handle is limited to low values, typically around 2,7 V. They must therefore be connected in series in order to attain higher voltages. This can be problematic because the variability of capacity from one ultracapacitor to another will result in varying tensions in each of them. There is then a risk that the tension might exceed the limit in one or more of them. However, the operating principle of the device allows managing the tensions in each ultracapacitor, which solves this problem.

The basic building block of the invention is the power module. It is composed of ultracapacitors and semiconductors acting as interruptors. The concept of commutated ultracapacitors connected in series is at the heart of the operating principle of the circuit. Each ultracapacitor can either be added or removed from a branch of ultracapacitors connected in series. This is done by the commutation of the semiconductors used as interruptors. This results in the ability to control at will the resulting tension between the two ends of a branch. The commutations are controlled by a microcontroller chip. The design of the device, as used in this research, also contains a control and protection circuit.

A converter can be made by using one or several branches in parallel. The tests made for this research used a topology consisting of three branches. In this topology, there is always one of the branches connected to the input, another connected to the output, and the third branch acts as a buffer. The buffer is used to avoid any discontinuity in the tensions,

and it also allows the measuring of the tensions of each ultracapacitor in the branch.

The experiments have been made with two types of DC/DC converters. The first one uses BJTs as interruptors between each branches and the input or output terminals and is bidirectional. The second converter used Schottky diodes instead of BJTs and is unidirectional.

The results show that the two types of converters work as expected, although weaknesses in the testing circuitry prevented the use of each converters with high current and power.

This device would be well adapted for applications needing both a power conversion function and energy storage. The smoothing of the power output of windmills or regenerative braking in electrical vehicles would be a interesting applications to pursue.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ANNEXES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Définitions et concepts de base	1
1.1.1 Les supercondensateurs	1
1.1.2 Les convertisseurs de puissance	2
1.2 Éléments de la problématique	2
1.3 Objectifs de recherche	3
1.4 Plan du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Supercondensateurs	4
2.2 Branchement de condensateurs en série	7
2.2.1 La problématique du branchement en série de condensateurs	7
2.2.2 L'avantage d'équilibrer les tensions des supercondensateurs en série	9
2.2.3 Les correctifs existants	10
2.3 Convertisseurs de puissance	12
2.3.1 Définition et fonction des convertisseurs de puissance électrique	12
2.3.2 Exemple du convertisseur hacheur abaisseur de tension (DC/DC buck convertir)	12

2.4	Convertisseurs DC/DC à condensateurs commutés (switched-capacitor DC/DC converters)	14
2.5	Conclusion de la revue de littérature	16
CHAPITRE 3 CONCEPTS ET SCHÉMAS		18
3.1	Branchement en série des modules	18
3.2	Fonctionnement général du dispositif	18
3.3	Circuit du module de puissance	19
3.4	Circuit logique de commande	22
3.5	Génération des tensions nécessaires au fonctionnement et diviseurs de tension .	29
3.6	Conclusion sur les concepts et schémas	33
CHAPITRE 4 MODÉLISATION DU CONCEPT		34
4.1	Modélisation des MOSFETs	34
4.2	Sous-circuits générateurs de tensions et de logique	36
4.3	Résultats	36
4.4	Conclusion sur la modélisation du concept	40
CHAPITRE 5 MISE EN OEUVRE ET TEST DU CONCEPT		44
5.1	Protocole de test du circuit de base	44
5.2	Concept de convertisseur à trois branches	47
5.2.1	Topologie et fonctionnement	47
5.2.2	Transistors BJT utilisés comme interrupteurs entre les trois branches pour convertisseur DC/DC	51
5.2.3	Fonctionnement du langage Forth	51
5.2.4	Algorithme de fonctionnement pour un convertisseur DC/DC avec transistors BJT utilisés comme commutateurs entre les trois branches . . .	52
5.2.5	Convertisseur DC/DC unidirectionnel	54
5.2.6	Algorithme de fonctionnement pour le convertisseur DC/DC unidirectionnel	56
5.3	Conclusion de la mise en oeuvre et test de l'invention	59
CHAPITRE 6 RÉSULTATS		61
6.1	Tests sur le convertisseur utilisant des transistors BJT comme commutateurs .	61
6.2	Test du convertisseur utilisant des diodes Schottky comme commutateurs . . .	61
6.3	Possibilité de générer des formes d'onde diverses	63
6.4	Conclusion sur les résultats	63

CHAPITRE 7 AMÉLIORATIONS POSSIBLES ET PERSPECTIVES D'APPLICA-	
TIONS	66
7.1 Améliorations à apporter au concept	66
7.2 Perspectives d'applications	67
CHAPITRE 8 CONCLUSION	69
8.1 Synthèse des travaux	69
8.2 Limitations de la solution proposée	70
8.3 Améliorations futures	71
RÉFÉRENCES	72
ANNEXES	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Table de vérité d'un verrou (RS Latch)	23
-------------	--	----

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Représentation du concept de condensateur classique	5
Figure 2.2	Schéma de la double couche électrochimique	6
Figure 2.3	Condensateurs en série	8
Figure 2.4	Correctifs conventionnels pour les condensateurs en série	11
Figure 2.5	Découplage de la puissance instantanée dans la conversion de puissance de AC vers DC	13
Figure 2.6	Circuit d'un convertisseur hacheur abaisseur (buck converter)	13
Figure 2.7	Circuit d'une pompe de Dickson	15
Figure 2.8	Allure des signaux d'horloge ϕ_1 et ϕ_2	15
Figure 2.9	Circuit d'un convertisseur abaisseur à condensateur commuté	17
Figure 3.1	Représentation du concept de base	18
Figure 3.2	Modules en série	19
Figure 3.3	Diagramme de fonctionnement du dispositif	20
	Rechargement par la diode	20
	Rechargement par MOSFET	20
	Alimentation de la charge	20
	Contournement par la diode	20
	Contournement de courant + ...	20
	Contournement de courant -	20
Figure 3.5	Modes de fonctionnement du module de puissance	20
Figure 3.6	Le circuit du module de puissance	21
Figure 3.7	Verrous logiques formés de portes NOR ou NAND	23
Figure 3.8	Le circuit logique pour actionner le supercondensateur SC1	24
Figure 3.9	Le circuit logique pour actionner le supercondensateur SC2	25
Figure 3.10	Algorithme équivalent du circuit logique pour actionner le supercon- densateur SC1	27
Figure 3.11	Algorithme équivalent du circuit logique pour actionner le supercon- densateur SC2	28
Figure 3.12	Le circuit intégré ICL7660S et les diviseurs de tension	30
Figure 3.13	Circuit idéalisé du régulateur de tension ICL7660S	30
Figure 3.14	Circuit idéalisé du régulateur ajustable de tension Shunt NCP100	32
Figure 3.15	Branchement du régulateur de tension ajustable Shunt NCP100	32
	MOSFET canal N	34

	MOSFET canal P	34
Figure 4.2	Modélisation idéalisée des MOSFETs	34
Figure 4.3	Circuit d'un module	35
Figure 4.4	Sous-circuit de commande et de protection	37
Figure 4.5	Sous-circuit régulateur de tensions utilisant le ICL7660S	38
Figure 4.6	Modélisation du circuit intégré ICL7660S	39
Figure 4.7	Sous-circuit créant une tension de référence de -0.9V utilisant le NCP100	39
Figure 4.8	Modélisation du circuit intégré NCP100	40
Figure 4.9	Modélisation du circuit intégré portes NOR quadruple CD4001	41
Figure 4.10	Modélisation du circuit intégré portes NAND quadruple CD4011	42
Figure 4.11	Résultat du blocage de la tension à 2.7 volts lors de la recharge des deux supercondensateurs	43
Figure 4.12	Résultat du blocage de la tension à 2.0 volts lors de la décharge des deux supercondensateurs	43
Figure 5.1	Photographie d'un module	45
Figure 5.2	Topologie d'un convertisseur contenant trois branches en parallèle de modules de puissance reliés en série entre eux	48
Figure 5.3	Matrice de l'interface entre le port B du microcontrôleur dsPic et les optocoupleurs	50
Figure 5.4	Organigramme du programme de convertisseur DC/DC utilisant des BJT comme commutateurs entre les branches	55
Figure 5.5	Circuit d'un convertisseur DC/DC à trois branches utilisant des diodes pour la commutation entre les branches et les bornes d'entrée et de sortie	57
Figure 5.6	Organigramme du programme de convertisseur DC/DC utilisant des diodes comme commutateurs entre les branches et les bornes d'entrée et de sortie	60
Figure 6.1	Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur à BJT sans charge	62
Figure 6.2	Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur à BJT avec charge de 56 ohms	62
Figure 6.3	Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur à diodes Schottky avec charge de 14 ohms	64
Figure 6.4	Tension de sortie du convertisseur formant une onde carrée	64
Figure 6.5	Tension de sortie du convertisseur formant une onde triangulaire par créneau	65

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	PROGRAMMES EN LANGAGE FORTH	73
Annexe B	Glossaire des mots créés en langage Forth	87

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AC	Alternating current : Courant alternatif
DC	Direct current : Courant continu
BJT	Bipolar Junction Transistor
MOSFET	MOS Field Effect Transistor

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

L'objet de ce mémoire de maîtrise est un dispositif de stockage d'énergie utilisant des supercondensateurs, et qui, utilisé en plusieurs exemplaires commutés reliés en série, permet de créer divers types de convertisseurs de puissance. En fait, le type de convertisseur réalisé dépendra de la programmation du microcontrôleur qui commandera l'ensemble du circuit ainsi que de la topologie de raccordement. L'objectif principal de ce mémoire est de démontrer la faisabilité de réaliser des convertisseurs de puissance et d'emmagasiner de l'énergie en utilisant cette technologie novatrice.

1.1 Définitions et concepts de base

1.1.1 Les supercondensateurs

Le fonctionnement d'un condensateur conventionnel repose sur l'accumulation de charges de signes opposés à la surface de deux électrodes séparées par un matériau non-conducteur, nommé « diélectrique ». Dans le cas des supercondensateurs, les électrodes sont poreuses et séparées par un électrolyte. C'est à-même cet électrolyte, à la surface des électrodes, que se forme la double couche électrochimique. Ce principe de fonctionnement permet aux supercondensateurs d'accumuler une charge beaucoup plus importante, et donc beaucoup plus d'énergie, que les condensateurs conventionnels.

Un autre aspect qui rend les supercondensateurs intéressants pour l'application décrite dans ce mémoire est leur densité de puissance. Le fonctionnement des batteries conventionnelles repose sur des réactions chimiques, un processus relativement lent. Le principe de fonctionnement des supercondensateurs repose plutôt sur le déplacement de charges électriques ou ioniques, plus rapides. Cela permet d'absorber ou de libérer plus d'énergie dans un laps de temps donné, ce qui équivaut à une capacité en puissance plus élevée. Pour plusieurs applications, cela est un atout non-négligeable.

Par contre, les supercondensateurs sont limités par la tension qu'ils peuvent atteindre, soit 2.7 V généralement. Cela fait en sorte qu'ils doivent être mis en série pour obtenir une tension plus élevée. Or, la mise en série de condensateurs pose un problème. En effet, la variabilité

des capacités des condensateurs mis en série fait en sorte que les tensions atteintes seront inégales d'un condensateur à l'autre. Il y a alors risque qu'un des supercondensateurs dépasse sa limite de tolérance en tension. Or, la solution retenue par le concept présenté dans ce mémoire permet de remédier à ce problème.

1.1.2 Les convertisseurs de puissance

Les convertisseurs de puissance ont comme rôle de transformer l'énergie électrique d'une forme donnée vers une autre. Par exemple, la transformation d'un courant alternatif (AC) vers un courant continu (DC). Il y a généralement un découplage entre la puissance instantanée en entrée et en sortie, ce qui implique l'utilisation d'éléments de stockage d'énergie dans le fonctionnement des convertisseurs. Ces éléments de stockage d'énergie consistent en des condensateurs et des inductances. Or, les inductances sont lourdes et coûtent cher dû à leur contenu en cuivre. Le type de convertisseur proposé dans ce mémoire n'utilise pas d'inductances.

1.2 Éléments de la problématique

Dans certaines applications qui font appel à une forme de conversion de puissance, une fonction de lissage de la puissance dans le temps est souhaitable. Par exemple, dans le cas des éoliennes, la puissance fournie par le vent est variable, ce qui crée un désappariement avec ce qui est demandé en sortie par le réseau électrique.

Dans les voitures électriques, il y a un convertisseur entre les batteries et les moteurs. La récupération de l'énergie au freinage nécessite une forte densité de puissance, c'est-à-dire une capacité à absorber beaucoup d'énergie en un laps de temps très court. Les batteries, qui ont une bonne densité d'énergie, n'ont cependant généralement pas une forte densité de puissance, car leur fonctionnement repose sur des réactions chimiques. Les supercondensateurs sont plus adaptés pour ce genre de tâche. La création de convertisseurs ayant également une capacité à emmagasiner de l'énergie semble alors intéressante pour ce genre d'applications. C'est ce que la technologie présentée ici offre comme solution : un convertisseur qui utilise des supercondensateurs dans son principe de fonctionnement, permettant ainsi de combiner les fonctions de conversion de puissance et de stockage d'énergie dans un seul dispositif. Le

fonctionnement du système est commandé par un microcontrôleur.

De plus, le caractère modulaire de la solution proposée permet une grande flexibilité. Cette flexibilité peut-être pleinement mise à profit par le degré de sophistication qui sera apporté à la programmation du microcontrôleur qui gèrera le fonctionnement du système.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette recherche est de démontrer la faisabilité du concept présenté. C'est-à-dire montrer que les modules fonctionnent individuellement tel qu'anticipé, et par la suite montrer qu'il est possible de réaliser des convertisseurs de puissance fonctionnels utilisant plusieurs de ces modules branchés en série.

1.4 Plan du mémoire

Le plan du mémoire est le suivant :

- Chapitre 1 : Introduction
- Chapitre 2 : Revue de littérature
- Chapitre 3 : Concepts et schémas
- Chapitre 4 : Modélisation du concept
- Chapitre 5 : Mise en oeuvre et test de l'invention
- Chapitre 6 : Résultats
- Chapitre 7 : Améliorations possibles et perspectives d'applications
- Chapitre 8 : Conclusion

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature traite de plusieurs sujets en lien avec le type de circuit sur lequel porte ce mémoire. Deux objectifs sont poursuivis. Le premier est de poser les bases théoriques pertinentes à la compréhension de ce qui suivra. Le deuxième est de montrer que les technologies existantes dans le domaine du stockage d'énergie électrique et la conversion de puissance comportent certaines lacunes qui pourraient être corrigées par le nouveau concept présenté dans ce mémoire.

La première section traite des supercondensateurs. En effet, le système étudié utilisant des supercondensateurs, un bref survol du principe de fonctionnement de ceux-ci semble approprié, bien que sa compréhension ne soit pas essentielle pour analyser le circuit.

La deuxième section portera sur la problématique du branchement en série de condensateurs. Des approches existantes y sont présentés.

La troisième section explique ce que sont les convertisseurs de puissance et illustre leur fonctionnement avec un exemple.

La dernière section présente le cas de convertisseurs existants fonctionnant sur la base de condensateurs commutés. Le principe de fonctionnement de ceux-ci diffère du concept qui sera présenté plus loin. Aussi, la revue de littérature n'a pas permis d'identifier d'art antérieur qui utiliserait déjà le principe de fonctionnement de ce concept.

2.1 Supercondensateurs

Le fonctionnement d'un condensateur conventionnel repose sur l'accumulation de charges de signes opposés à la surface de deux électrodes, généralement des plaques conductrices séparées par un matériau isolant nommé « diélectrique » [1]. La capacité C du condensateur est déterminée par l'équation :

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, \quad (2.1)$$

Où ϵ représente la permittivité du matériau diélectrique, A est l'aire de la surface des électrodes et d la distance les séparant.

Dans le cas des supercondensateurs, les électrodes sont poreuses et habituellement composées de charbon actif. Elles sont séparées par un électrolyte, soit une solution de sels dans un solvant approprié. C'est à-même cet électrolyte, à la surface des électrodes, que se forme la double couche électrochimique, soit une couche d'électrons et une couche d'ions de charge positive. Ce principe de double couche électrochimique a d'abord été élaboré par Helmholtz en 1879. En somme, Helmholtz postulait que la surface d'électrons et la surface d'ions de charge positives se formant à l'interface de l'électrode et de l'électrolyte peuvent être modélisées comme formant un condensateur. Cette théorie a été raffinée par Gouy et Chapman en 1909 par la modélisation de la deuxième couche comme étant plutôt une région diffuse dans le modèle. Stern a proposé en 1924 un modèle qui combine la théorie de Helmholtz au modèle Gouy-Chapman [2].

L'équation 2.1 montre que la capacité d'un condensateur donné est directement proportionnelle à l'aire A de la surface des électrodes et inversement proportionnelle à la distance d qui les sépare. Or, c'est donc la grande surface découlant de l'interface entre l'électrode poreuse en charbon actif et l'électrolyte, jumelée à la très faible distance de séparation entre les deux couches de particules positives et négatives, de l'ordre des dimensions de l'atome, qui permet aux supercondensateurs d'accumuler une densité de charge électrique importante. Par exemple, la distance entre les charges dans la double couche électrochimique est de l'ordre des dimensions d'un atome, soit environ 10 fois moins que pour un condensateur électrolytique ordinaire de tension équivalente. La capacité est donc environ 10 fois plus grande dû au principe de double couche électrochimique. À cela s'ajoute l'effet d'avoir une surface d'électrode

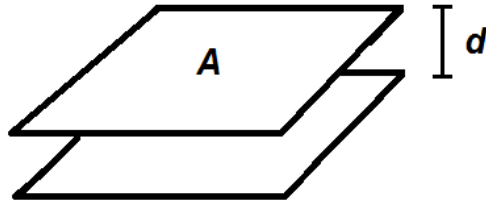


Figure 2.1 Représentation du concept de condensateur classique

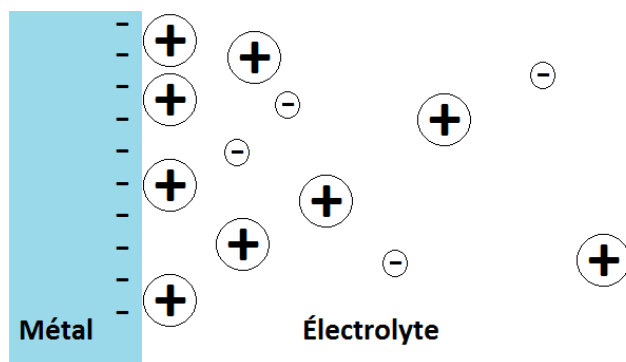


Figure 2.2 Schéma de la double couche électrochimique

plus grande par l'utilisation de charbon actif. Si l'on considère un facteur 10 pour l'aire, la capacité d'un supercondensateur se trouve à être de l'ordre de 100 fois plus grande que pour un condensateur ordinaire de mêmes dimensions.

En 1957, un dispositif utilisant ce principe a été breveté par Howard Becker pour le compte de la General Electric Company [3]. Curieusement, l'accent n'était pas mis sur la grande capacité de stockage d'énergie de l'invention mais plutôt sur son utilité pour amortir les oscillations indésirables dans les redresseurs.

Cependant, dû aux contraintes de l'électrolyte, les supercondensateurs existants sur le marché ont une limite de tension d'environ 2,7 V seulement. En effet, l'électrolyte organique a une tension de dissociation d'environ 1,35 V par électrode, ce qui limite la tension totale aux bornes du supercondensateur à 2,7 V. Cela implique donc que le branchement en série de ceux-ci sera requis pour des applications nécessitant une tension plus élevée. Or, le branchement en série de condensateurs, tout comme les supercondensateurs, pose un problème.

2.2 Branchement de condensateurs en série

2.2.1 La problématique du branchement en série de condensateurs

Le branchement de condensateurs en série pose problème en raison de la variabilité des valeurs réelles de capacités de chacun des condensateurs. En effet, en raison des tolérances lors de la fabrication et de la variation de la capacité avec l'âge du condensateur, les valeurs peuvent varier de façon significative.

Cela est problématique car la tension aux bornes du condensateur est fonction de la valeur de sa capacité [1]. Celle-ci est définie par :

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (2.2)$$

On peut retrouver ce résultat à partir des équations de la charge et du courant dans les condensateurs [4] [5]. La charge emmagasinée dans un condensateur est déterminée par l'équation :

$$q(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau + q(0). \quad (2.3)$$

L'équation du courant est :

$$i(t) = C \frac{dv}{dt}. \quad (2.4)$$

l'équation qui détermine la tension est alors donnée par :

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + v(0). \quad (2.5)$$

En posant l'hypothèse que le condensateur est complètement déchargé au temps $t = 0$,

alors on aura que :

$$q(0) = 0, \quad v(0) = 0. \quad (2.6)$$

La tension sera alors proportionnelle à la charge et inversement proportionnelle à la capacité :

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau = \frac{q(t)}{C} = \frac{Q}{C}. \quad (2.7)$$

Et puisque dans le cas des condensateurs en série, le courant passant dans chacun des condensateurs est le même, la valeur de $Q = q(t)$ sera également la même, ce qui signifie que la tension accumulée aux bornes de ceux-ci sera déterminée uniquement par l'inverse de la valeur de la capacité C :

$$v_1(t) = \frac{Q}{C_1}, \quad v_2(t) = \frac{Q}{C_2}, \quad \dots, \quad v_n(t) = \frac{Q}{C_n}. \quad (2.8)$$

Cela implique qu'un condensateur ayant une capacité plus faible que les autres condensateurs dans la série se retrouvera avec une tension plus élevée que les autres après recharge. Il y a donc risque de dépassement de la limite de tolérance du condensateur, ce qui entraînerait un claquage. Dans le cas de supercondensateurs qui accumulent une quantité appréciable d'énergie, ce claquage peut avoir de sérieuses conséquences et entraîner la destruction du système. En conséquence, certains dispositifs de rééquilibrage des tensions ont été imaginés.

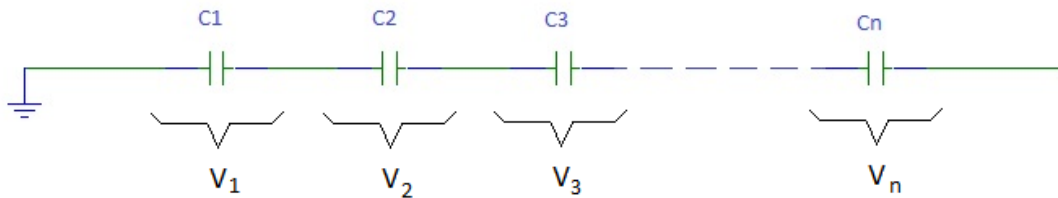


Figure 2.3 Condensateurs en série

2.2.2 L'avantage d'équilibrer les tensions des supercondensateurs en série

Barrade et al.[6] ont présenté un exemple numérique illustrant l'avantage, d'un point de vue de la quantité d'énergie emmagasinée, d'utiliser une technique d'équilibrage des tensions de supercondensateurs en série. Cet exemple sera repris ici, mais avec les valeurs de supercondensateurs qui seront employés pour l'expérimentation du circuit dont il est question dans ce mémoire.

Le cas étudié considère un système de deux supercondensateurs en série. Si les deux supercondensateurs sont fidèles aux spécifications, alors $C_1 = C_2 = 350$ F, et les valeurs des tensions limites sont de 2.7 V. L'énergie se calcule par l'équation :

$$E = \frac{1}{2}CV^2. \quad (2.9)$$

Chacun des supercondensateurs aura donc accumulé 1275.75 J, pour un total de 2551.5 J

Si maintenant l'un des condensateurs, par exemple C2, présente une capacité de 20 % inférieure aux spécifications, soit 280 F, alors sans rééquilibrage des tensions on devra limiter sa tension lorsqu'elle atteindra le seuil de 2.7 V. Cela implique que le condensateur C1 de 350 F lui n'atteindra que 2.16 V. Le supercondensateur C1 aura accumulé 816.48 J, et C2 1020.6 J, pour un total de 1837.08 J. Dans le cas d'un équilibrage de la tension de C1 à 2.7 V, celui-ci accumulera donc à nouveau 1275.75 J, et le total pour le système de 2296.35 J.

L'équilibrage des tensions permet donc un gain de 459.27 J ou 25 % de l'énergie accumulée.

2.2.3 Les correctifs existants

Afin de remédier au problème de déséquilibre des tensions, quatre types de correctifs usuels sont identifiés dans la littérature [7] [8]. Ceux-ci sont illustrés à la figure 2.4. Il s'agit de :

- Résistances en parallèle ;
- Résistances commutées en parallèle ;
- Diodes Zener en parallèle ;
- Convertisseurs DC/DC.

Les résistances en parallèle forment un diviseur de tension qui vise à corriger les déséquilibres par le biais de la dissipation thermique du trop plein d'énergie des condensateurs chargés à leur limite de tension. Cependant, le désavantage principal de cette technique est qu'il en résulte une perte d'énergie constante et relativement importante. Cela mène à un faible rendement du système.

Le concept de résistances commutées, avec un circuit d'équilibrage actif, permet d'effectuer un rebalancement tout en mitigant les pertes. Une résistance est commutée en parallèle avec le condensateur seulement si sa tension dépasse un seuil critique. Cependant, cela ajoute un niveau de complexité au système sans pour autant éliminer la perte d'énergie par dissipation thermique inhérente à l'utilisation de résistances.

La diode Zener est une diode qui est conçue pour être utilisée dans sa région de conduction en courant inversé afin de réguler une tension. En branchant une diode Zener en parallèle avec un condensateur, c'est en quelque sorte l'équivalent passif du système à résistance commutée qui est obtenu. En effet, la diode Zener ne conduit pas de courant, jusqu'à ce qu'une tension, la tension Zener, soit atteinte. Alors, elle agit comme une résistance qui dissipe de l'énergie. C'est donc un système moins complexe que celui des résistances commutées, mais où la perte d'énergie par dissipation thermique demeure. Cela ajoute aussi comme contrainte de design la nécessité de trouver une diode Zener qui corresponde aux spécifications de tension et de courant voulues.

Le correctif faisant appel à des convertisseurs DC/DC est le seul des quatre qui ne dissipe pas de l'énergie dans le but d'égaliser les tensions des supercondensateurs. En fait, l'énergie en trop d'un supercondensateur surchargé sera transférée par le convertisseur vers l'un des deux supercondensateurs adjacents. Cela permet d'obtenir un meilleur rendement énergétique. Ce-

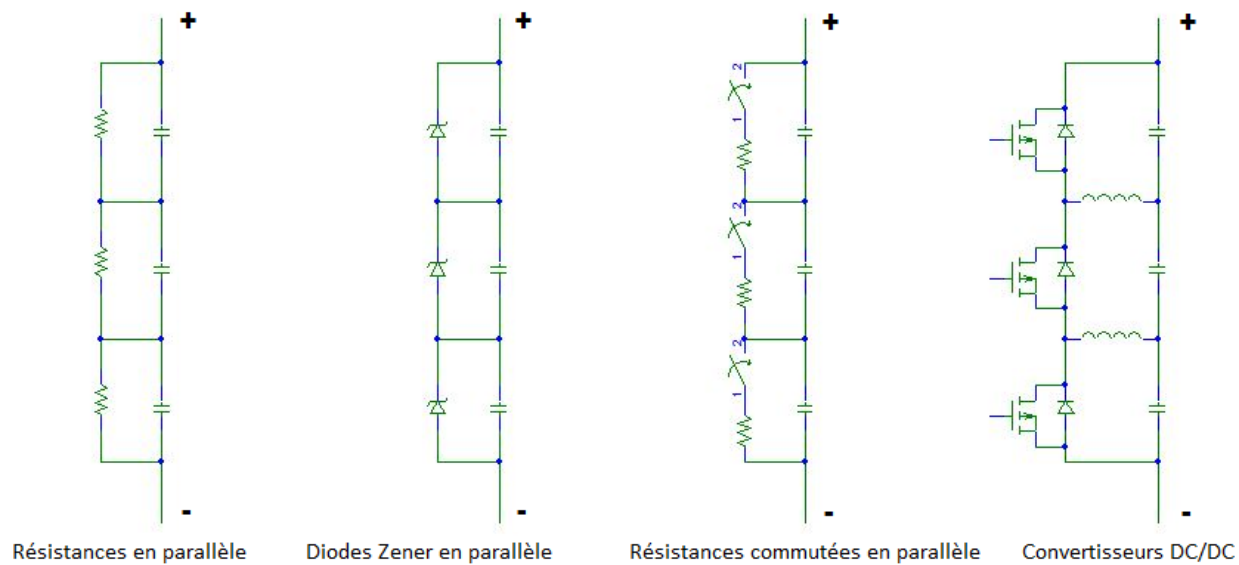


Figure 2.4 Correctifs conventionnels pour les condensateurs en série

pendant, cette solution est coûteuse et plus complexe que les trois présentées plus haut.

2.3 Convertisseurs de puissance

2.3.1 Définition et fonction des convertisseurs de puissance électrique

Un convertisseur de puissance est “un module de base des systèmes d’électronique de puissance” [9]. Leur fonction est de transformer l’énergie électrique d’une forme d’onde donnée vers une forme différente. Les différents types de convertisseurs sont :

- AC vers DC (redresseurs) ;
- DC vers AC (onduleurs) ;
- DC vers DC (élevateurs ou réducteurs) ;
- AC vers AC (changement de fréquence ou forme d’onde).

À l’exception des convertisseurs DC/DC, il y aura généralement un découplage entre la puissance instantanée en entrée et la puissance instantanée en sortie. Il en va de même pour l’énergie. Cela implique donc la présence d’éléments de stockage d’énergie dans le circuit d’un tel convertisseur. À titre d’exemple simple, le cas de la conversion d’un courant alternatif vers un courant continu illustre comment l’énergie excédentaire des pics de la sinusoïde doit être transférée dans les vallées, mais ce à un intervalle Δt plus tard, afin d’obtenir une puissance et un courant lisses et continus. En effet, dans la figure 2.5, l’aire sous la courbe de la puissance en fonction du temps représente l’énergie.

Pour remplir leur fonction, les convertisseurs de puissance utilisent donc des semiconducteurs à titre d’interrupteurs et des condensateurs et inductances comme éléments de stockage d’énergie.

2.3.2 Exemple du convertisseur hacheur abaisseur de tension (DC/DC buck converter)

La figure 2.6 illustre le circuit d’un convertisseur hacheur abaisseur de tension, ainsi que la forme de l’onde de la tension aux bornes de la diode.

Le fonctionnement de ce circuit est relativement simple. L’interrupteur, généralement un semiconducteur tel un transistor, est actionné à une fréquence donnée, ce qui génère une tension en forme d’onde carrée aux bornes de la diode. Évidemment, l’onde carrée n’est pas la sortie désirée. En fait, la sortie désirée s’apparente à la tension moyenne de cette onde carrée. La façon d’obtenir cette moyenne est d’ajouter un filtre passe-bas. Celui-ci est constitué d’une inductance et d’un condensateur, ce qui en fait un filtre d’ordre deux [5].

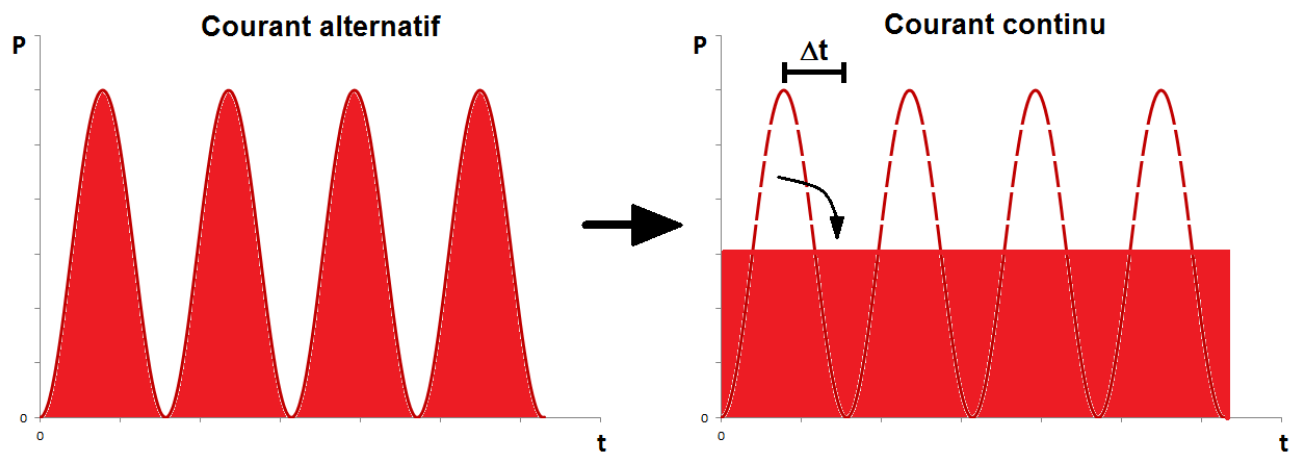


Figure 2.5 Découplage de la puissance instantanée dans la conversion de puissance de AC vers DC

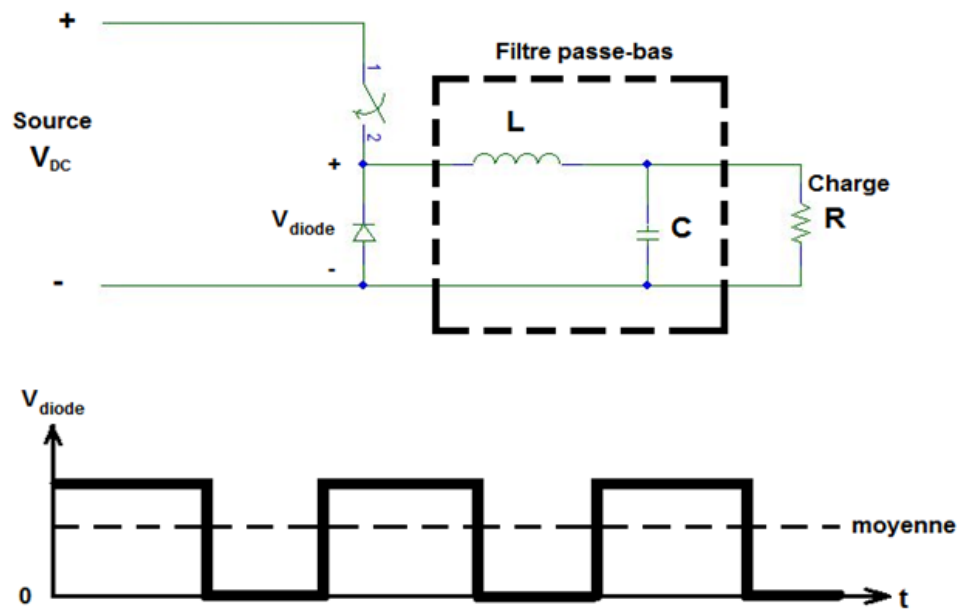


Figure 2.6 Circuit d'un convertisseur hacheur abaisseur (buck converter)

Le rôle de l'inductance est de stabiliser le courant alors que celui du condensateur est de stabiliser la tension de sortie. Notons au passage que ces deux éléments sont des dispositifs de stockage d'énergie. Le rôle de la diode est de fournir un chemin de passage au courant dans l'inductance lorsque l'interrupteur est ouvert.

Le circuit passe-bas du second ordre, constitué de l'inductance et du condensateur, a une fréquence de coupure et un facteur de qualité déterminés par :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.10)$$

Ce sont là deux paramètres de design importants puisqu'ils nous indiquent la relation entre la fréquence du hacheur et la valeur de l'inductance.

Le poids et le coût de l'inductance militent en faveur d'un design qui minimisera la valeur de cette dernière. Cela implique un biais favorable à des fréquences des commutation élevées. Or, les pertes de commutation sont directement proportionnelles à la fréquence. De plus, les fréquences de commutation élevées tendent à générer des interférence électromagnétiques indésirable. De cela, on peut conclure qu'un convertisseur n'employant pas d'inductance et capable de fonctionner à de basses fréquences de commutation présenterait certains avantages.

2.4 Convertisseurs DC/DC à condensateurs commutés (switched-capacitor DC/DC converters)

Il existe des convertisseurs fonctionnant sur le principe de condensateurs commutés. Ce sont des convertisseurs DC/DC, généralement de faible puissance. Ils ont été développés dans le but de maintenir stable la tension fournie par la batterie dans de petits appareils électroniques tels les lecteurs mp3 et téléphones portables [10]. Leur principe de fonctionnement repose sur la "pompe de charge". La charge de condensateurs est transférée vers d'autres condensateurs, au moyen de commutateurs. En bout de ligne, un condensateur accumulera soit une tension plus élevée ou plus basse, selon le design, afin d'alimenter une charge donnée. Le tout est géré par des signaux d'horloge appropriés à la fonction recherchée.

Les convertisseurs élévateurs de tension à condensateurs commutés sont généralement

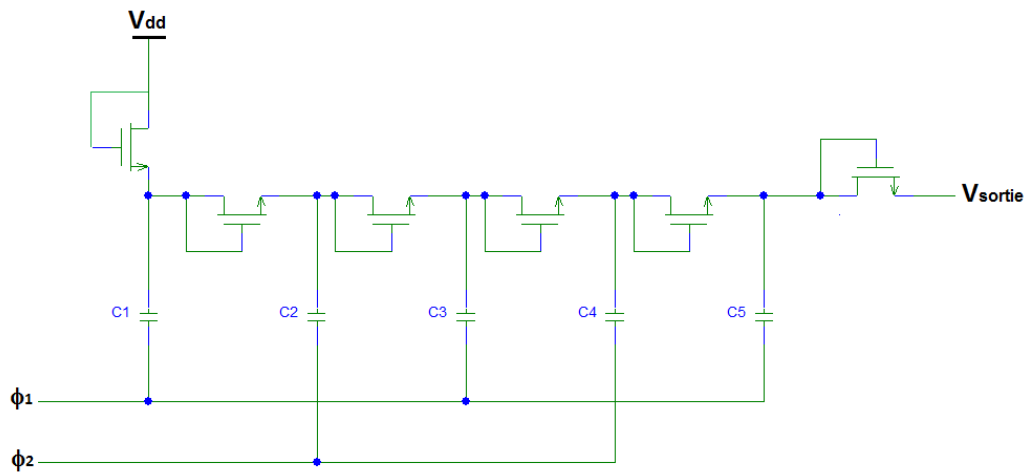


Figure 2.7 Circuit d'une pompe de Dickson

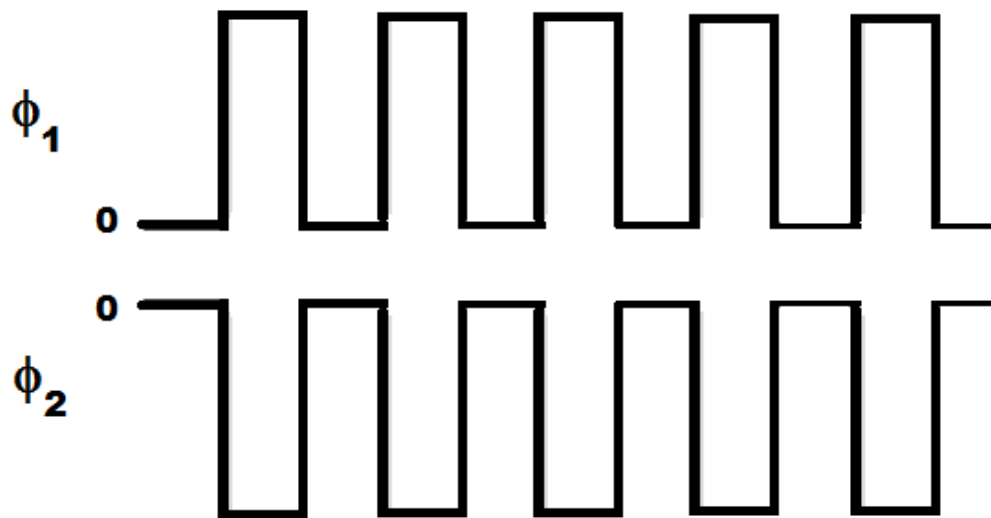


Figure 2.8 Allure des signaux d'horloge ϕ_1 et ϕ_2

basés sur le concept de la “pompe de Dickson”, représenté à la figure 2.7. Le principe de fonctionnement repose sur le transfert de la charge d’un condensateur au suivant. La charge transférée s’additionne à celle déjà présente dans le condensateur qui la reçoit. Il en résulte une augmentation de la charge totale et donc de la tension aux bornes de chacun des condensateurs successifs. Dans le cas illustré, la tension devrait théoriquement quintupler. Cependant, la chute de tension dans les transistors servant de commutateurs va diminuer cette valeur. Les signaux d’horloge sont illustrés à la figure 2.8 .

Le circuit présenté à la figure 2.9 est un convertisseur abaisseur de tension. Dans ce cas, la tension V_{dd} se trouve répartie entre les trois condensateurs qui se trouvent branchés en série lorsque le signal d’horloge ϕ_1 ferme l’interrupteur y correspondant. De par la disposition des diodes, ces condensateurs se retrouvent plutôt branchés en parallèle lorsqu’ils doivent être déchargés par la fermeture de l’interrupteur actionné par l’horloge ϕ_2 . Théoriquement, cela devrait faire en sorte que la tension V_{sortie} soit d’un tiers de V_{dd} . Les chutes de tension des diodes modifieront légèrement cette valeur.

2.5 Conclusion de la revue de littérature

Les objectifs de cette revue de littérature étaient de poser les bases théoriques pertinentes au sujet du mémoire, ainsi que de montrer que certaines lacunes des technologies existantes pourraient être corrigées par le concept introduit dans ce mémoire. Le fonctionnement des supercondensateurs, reposant sur le principe de double couche électrochimique et l’utilisation d’électrodes poreuses, a été présenté. Ensuite, la problématique du branchement de condensateurs en série a été exposée. Des correctifs conventionnels à cette problématique, qui comportent cependant certaines lacunes, ont été introduits. La revue de littérature se termine par une présentation des convertisseurs de puissance. Ces informations seront utiles à la compréhension des concepts et schémas de l’invention dont ce mémoire traite tout au long des prochains chapitres.

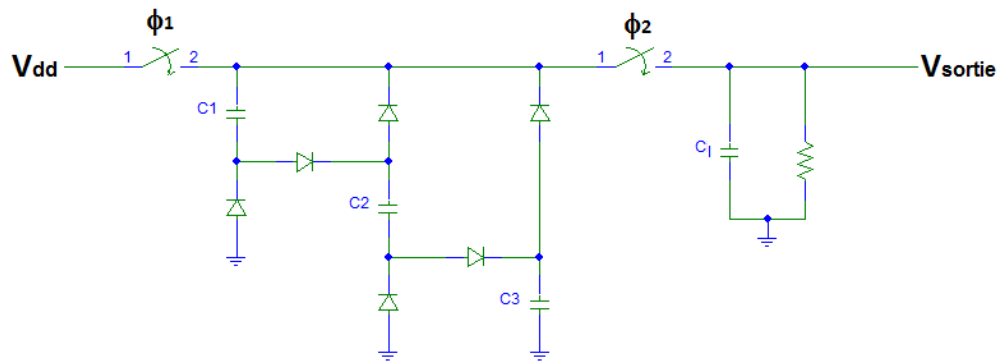


Figure 2.9 Circuit d'un convertisseur abaisseur à condensateur commuté

CHAPITRE 3

CONCEPTS ET SCHÉMAS

Le coeur du projet réside dans la partie du circuit qui constitue le module de puissance. Celui-ci est essentiellement composé des supercondensateurs et des semiconducteurs servant d'interrupteurs. À la base, le circuit repose sur le concept d'un supercondensateur commuté, et donc commandable. Cette idée, réduite à sa plus simple expression, est représentée à la figure 3.1. Les concepts et schémas qui suivent sont basés sur les plans originaux de l'invention réalisés par Georges-Émile April en juillet 2010.

3.1 Branchement en série des modules

Ce concept trouve son utilité lorsque plusieurs modules sont branchés en série, comme à la figure 3.2. Il en résulte alors un dispositif qui s'apparente à un condensateur programmable, c'est-à-dire qu'il est possible, en actionnant les interrupteurs, d'ajouter ou de retirer des condensateurs de la série, modifiant du même coup la tension aux bornes du dispositif. L'utilisation d'un tel dispositif, actionné par un microcontrôleur, ouvre de vastes possibilités. En effet, il sera possible de générer à peu près n'importe quelle forme d'onde de tension, selon l'algorithme de commande programmé dans le microcontrôleur. Cela rend possible la création d'un convertisseur universel. L'utilisation de supercondensateurs donne au convertisseur la capacité de stocker de l'énergie, ainsi qu'une forte densité de puissance.

3.2 Fonctionnement général du dispositif

Le fonctionnement du dispositif peut être illustré en identifiant les différentes fonctions et leurs relations. Le coeur du concept réside dans le module de puissance. Les tensions des supercondensateurs de ce dernier sont mesurées et transmises au circuit de protection, qui

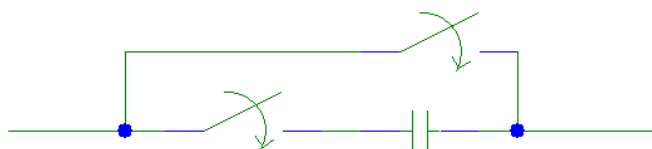


Figure 3.1 Représentation du concept de base

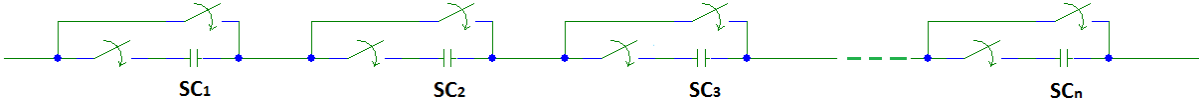


Figure 3.2 Modules en série

évalue si les limites de sécurité sont dépassées. Le circuit de protection envoie des signaux au circuit de commande si les limites sont effectivement atteintes. Le circuit de commande reçoit également les signaux du microcontrôleur, par le biais des démultiplexeurs. Enfin, le circuit de commande envoie les signaux de grilles pour actionner les MOSFETs du module de puissance, en fonction des commandes reçues et des conditions sur les limites de tension. Ce fonctionnement est illustré dans le diagramme-bloc de la figure 3.3.

Il y a six principaux modes de fonctionnement du module de puissance, déterminés selon le sens du courant et l'état des interrupteurs constitués par les MOSFETs. Ces six modes de fonctionnement sont illustrés à la figure 3.5. Le principe directeur est de toujours fournir un chemin possible pour le courant. Dans le cas où aucun des MOSFETs ne soit actionné, le courant passe par une des deux diodes D1 ou D2, selon le sens de ce courant. De plus, les deux MOSFETs ne doivent jamais être actionnés en même temps, car cela occasionnerait un court-circuit.

3.3 Circuit du module de puissance

Chacun des modules de puissance constituera une “cellule”. Plus spécifiquement, le design retenu pour implanter cette idée, illustré à la figure 3.6, comporte quatre MOSFETs (deux canal-N et deux canal-P) ainsi que quatre diodes Schottky, en plus des deux supercondensateurs. Un des principes qui a guidé le développement de cette topologie est l'obligation de toujours fournir un chemin au courant, peu importe les circonstances. La nécessité de fournir une tension suffisante pour alimenter l'électronique du circuit local de commande et de protection a également influencé la topologie retenue.

Les MOSFETs Q_{N1} et Q_{P2} font office d'interrupteurs. Lorsqu'ils sont fermés, ils permettent au courant de circuler dans les supercondensateurs SC1 et SC2 respectivement. À l'opposé, les MOSFETs Q_{P1} et Q_{N2} permettront au courant de contourner ces supercondensateurs.

Les diodes Schottky D1 et D3 vont permettre à un courant positif de recharger les supercon-

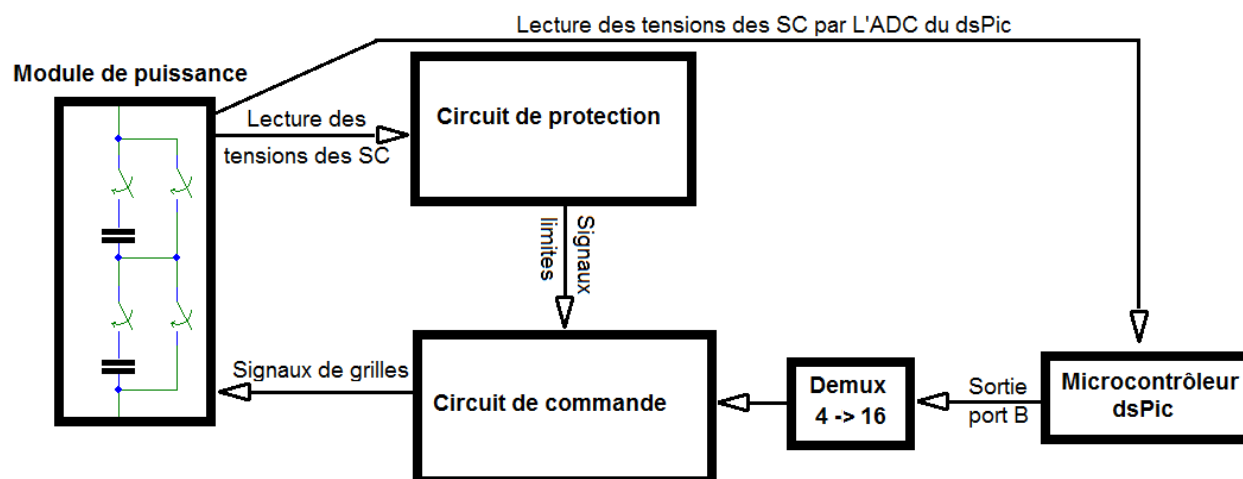


Figure 3.3 Diagramme de fonctionnement du dispositif

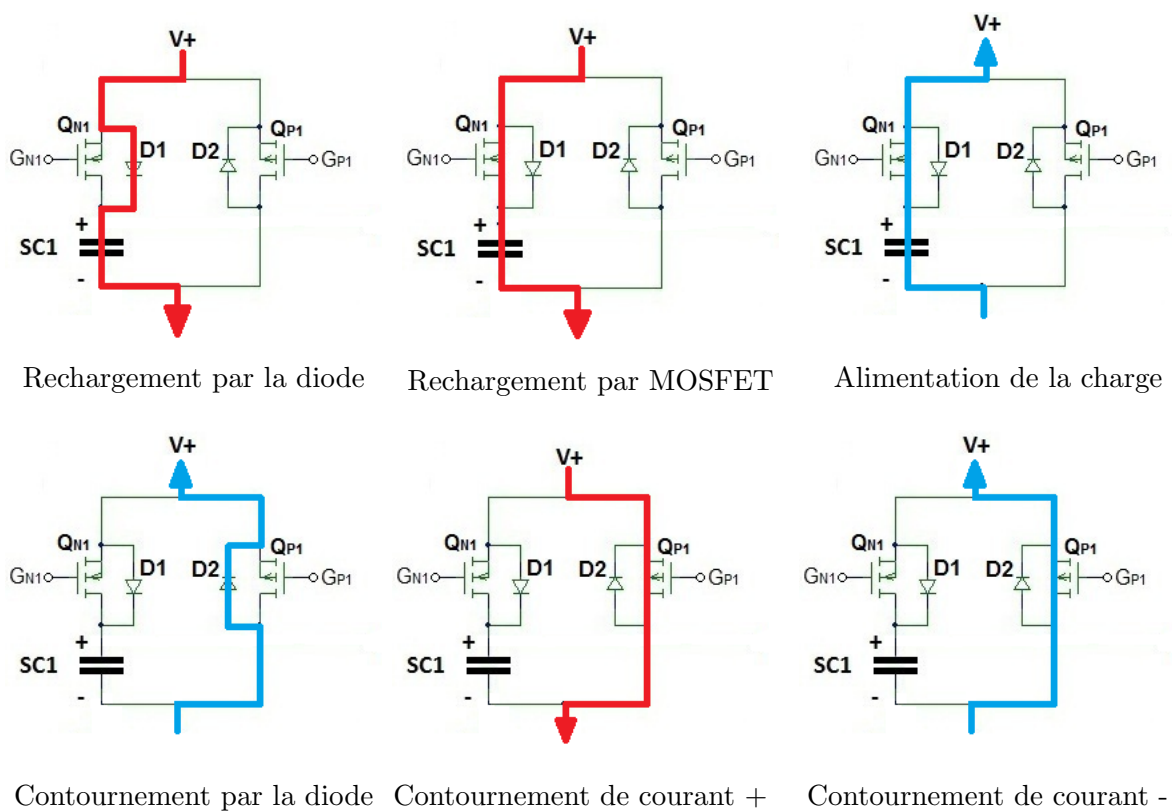


Figure 3.5 Modes de fonctionnement du module de puissance

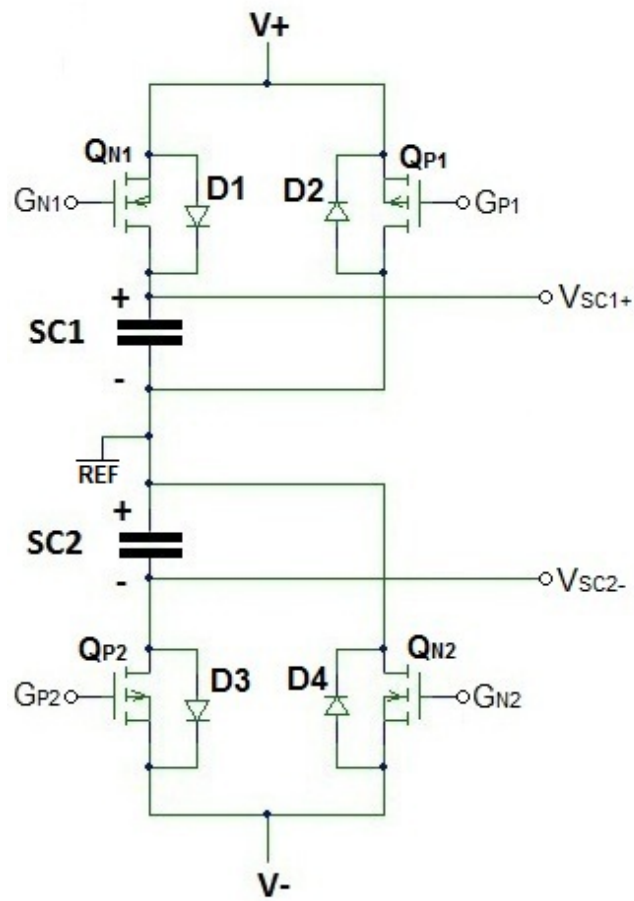


Figure 3.6 Le circuit du module de puissance

densateurs, et ce même lorsque les MOSFETs Q_{N1} et Q_{P2} ne conduisent pas, sans toutefois permettre à un courant contraire de les décharger. La tâche des diodes Schottky D2 et D4 consiste à permettre à un courant négatif de contourner les supercondensateurs sans les décharger, même lorsque les MOSFETs Q_{P1} et Q_{N2} ne conduisent pas.

C'est le circuit logique qui fournit les signaux de grille G_{N1}, G_{N2}, G_{P1} et G_{P2} qui actionnent respectivement les MOSFETs Q_{N1}, Q_{N2}, Q_{P1} et Q_{P2} . Le circuit logique reçoit les commandes du microcontrôleur par le biais d'une interface composée d'optocoupleurs afin d'isoler électriquement le microcontrôleur de chacune des cellules.

Ce design n'est qu'une implantation possible du concept parmi d'autres. L'existence de supercondensateurs de 5 V ou plus rendrait possible la création de cellules ne comportant qu'un seul supercondensateur. En effet, l'utilisation de deux supercondensateurs pour chacune des cellules s'explique par la nécessité de maintenir une tension minimale pouvant alimenter les circuits de commande et de protection de chacun des modules. Cela leur permet d'être auto-suffisants et autonomes du point de vue de l'alimentation et de la protection, ce qui simplifie l'interface des tous les modules avec le microcontrôleur. En effet, il faut tenir en compte le fait que la tension de chacun des modules par rapport à la masse variera beaucoup de l'un à l'autre. Par exemple, pour une série de 100 modules, la tension par rapport à la masse à l'extrémité du dernier module peut dépasser 500 V.

3.4 Circuit logique de commande

Le circuit logique de commande est composé de portes logiques non-ou (NOR) quadruples CD4001 et non-et (NAND) quadruples CD4011, ainsi que des comparateurs quadruples basse puissance LP339. Deux optocoupleurs doubles MCT6 servent d'interface avec le microcontrôleur.

La partie du circuit de logique qui commande le supercondensateur SC1, de tension positive par rapport à la référence locale, est composée de quatre portes NOR, tel que montré à la figure 3.8 . Les deux portes NOR qui sont actionnées par les deux sorties de l'optocoupleur MCT6 forment une bascule asynchrone, ou verrou ("RS latch").

L'état de ce verrou détermine la commande que le microcontrôleur veut transmettre au

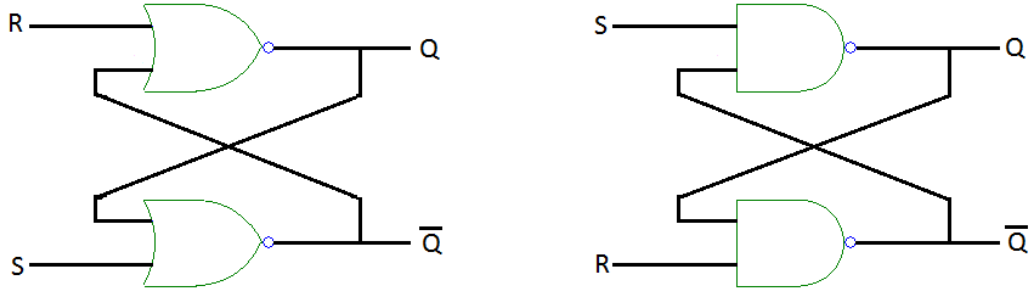


Figure 3.7 Verrous logiques formés de portes NOR ou NAND

Tableau 3.1 Table de vérité d'un verrou (RS Latch)

S	R	Q	Q'
1	0	1	0
0	1	0	1
0	0	inchangé	inchangé
1	1	invalide	invalide

module de puissance. Si sa sortie Q' vaut 0, alors c'est que le supercondensateur devrait être intégré à la branche en série. Cependant, le signal aux grilles des MOSFETs de puissance Q_{N1} et Q_{P1} dépend également des conditions relatives à la tension des supercondensateurs.

Le comparateur LP339 alimenté par le signal FB3 détermine si le supercondensateur SC1 a une tension supérieure à 2.0 V. Si la condition est respectée, la sortie du comparateur sera un 0 logique. Avec deux 0 logiques en entrée, la porte NOR fournira un 1 logique en sortie, donc alimentera la grille G_{N1} à V_{DD2} , branchant ainsi le supercondensateur SC1 en série avec les autres. Le comparateur LP339 alimenté par le signal FB4 détermine si la tension du supercondensateur SC1 se maintient sous le seuil limite de 2.7 V. Si cette condition est respectée, la sortie du comparateur sera un 0 logique. Avec deux 0 logiques en entrée, la porte NOR fournira un 1 logique en sortie, donc alimentera la grille G_{P1} à V_{DD2} . Avec cette tension de grille, le MOSFET ne conduit pas. Par contre, si la condition n'est pas respectée, alors la porte logique NOR fournira un 0 logique, résultant dans ce cas en une tension négative à la grille G_{P1} , faisant entrer le MOSFET en conduction. Le courant contournera alors le supercondensateur. Dans cette éventualité, la diode présente dans le circuit de logique assure que le MOSFET Q_{N1} ne soit plus en conduction afin d'éviter un court-circuit.

Dans le circuit logique qui commande les interrupteurs du supercondensateur SC2, la

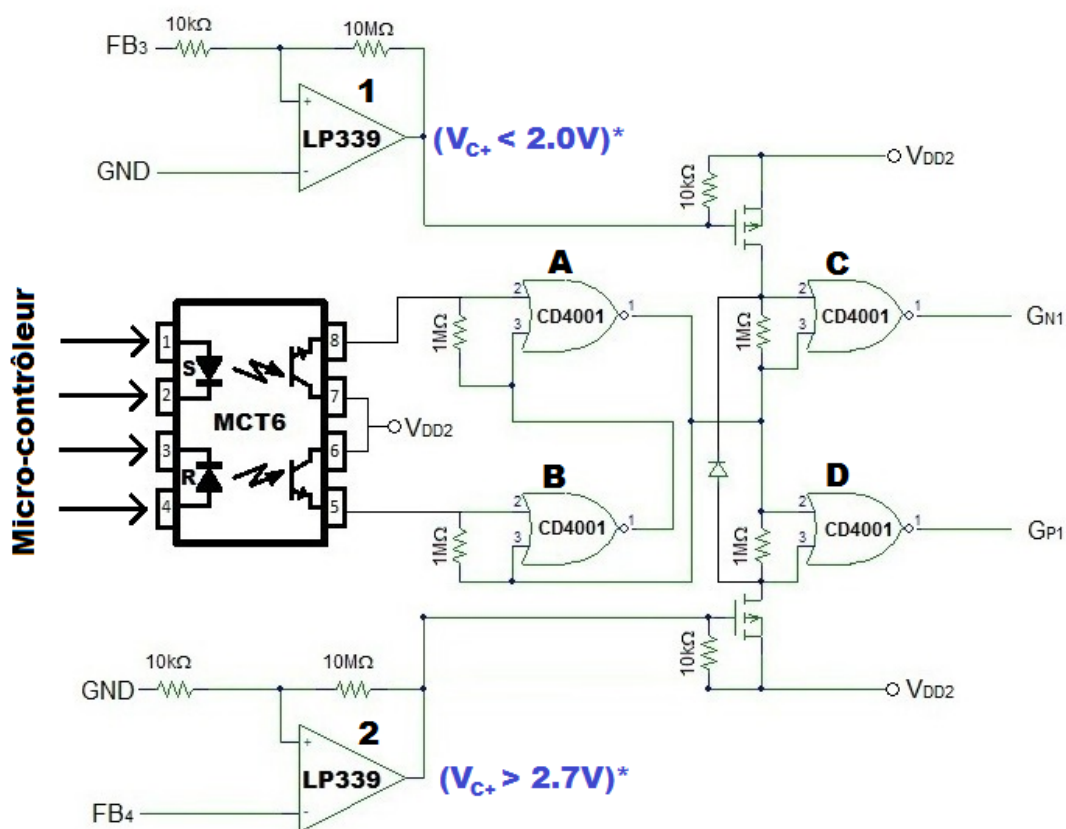


Figure 3.8 Le circuit logique pour actionner le supercondensateur SC1

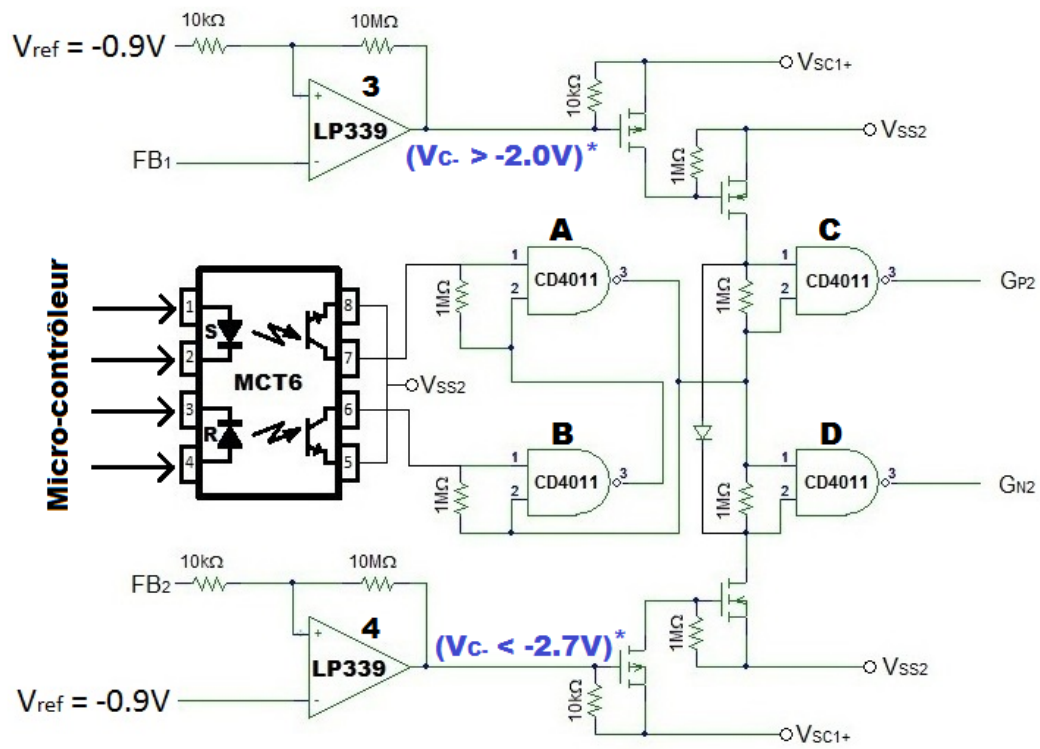


Figure 3.9 Le circuit logique pour actionner le supercondensateur SC2

logique se veut la même que précédemment, mais adaptée pour tenir compte du contexte où les tensions sont négatives par rapport à la référence locale. La sortie du verrou, maintenant composé de portes NAND, est représentée par la valeur Q de la table de vérité, et vaudra 1 si le microcontrôleur ordonne la mise en série du supercondensateur SC2. Si la condition que la tension aux bornes de SC2 soit supérieure à 2 V est respectée, alors le signal de grille G_{P2} sera un 0 logique, soit une tension V_{ss2} . Cela fermera cet interrupteur et le supercondensateur SC2 se trouvera branché en série dans la branche. De même, si la tension du supercondensateur SC2 se maintient sous 2.7 V, la porte NAND fournira un 1 logique, soit un signal de grille G_{N2} de tension positive, ce qui ne mettra pas le MOSFET Q_{N2} en conduction. Par contre, si cette condition n'est pas respectée, alors ce MOSFET entrera en conduction et le courant contournera le supercondensateur SC2. Comme précédemment, une diode verrait à ajuster le signal de grille G_{P2} en conséquence pour éviter un court-circuit.

Deux diagrammes représentant des algorithmes équivalents au fonctionnement de ces deux circuits logiques sont présentés aux figures 3.10 et 3.11 pour aider à leur compréhension.

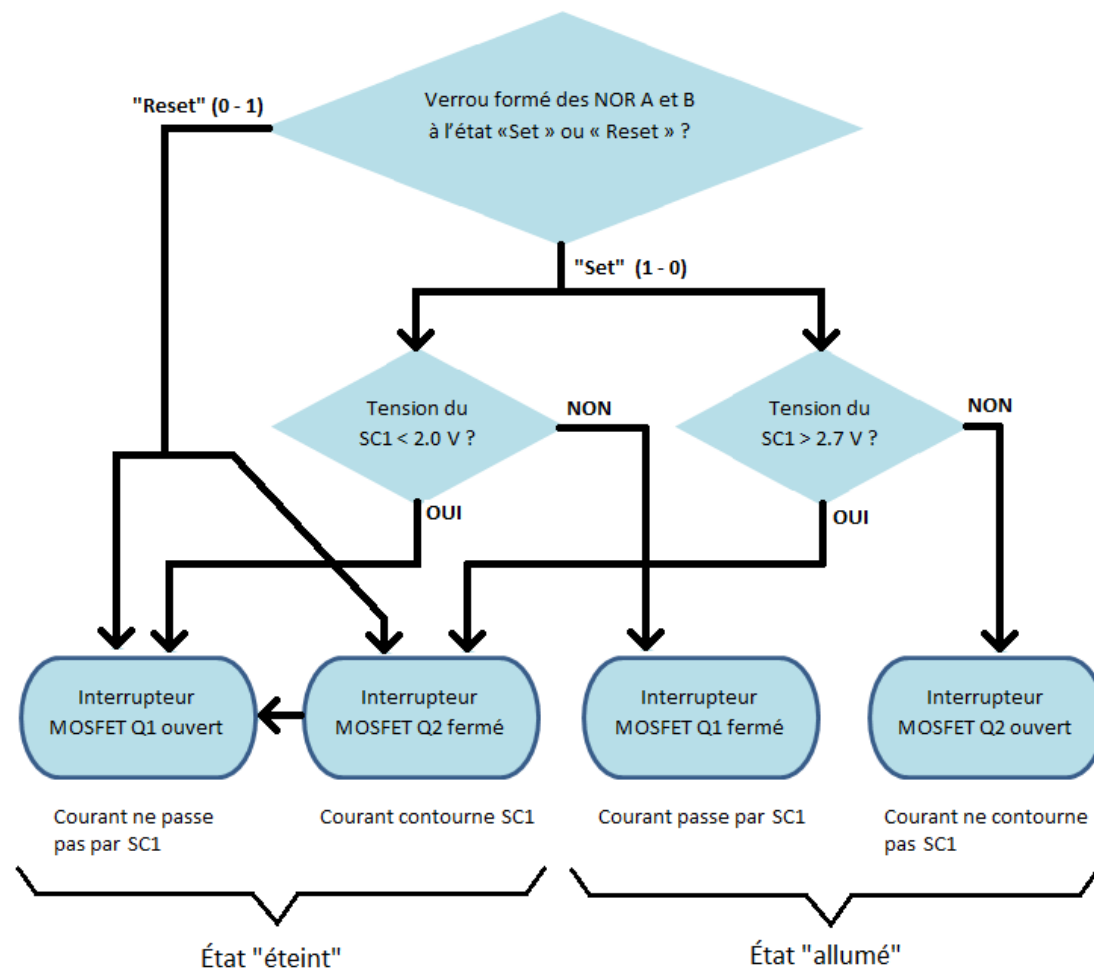


Figure 3.10 Algorithme équivalent du circuit logique pour actionner le supercondensateur SC1

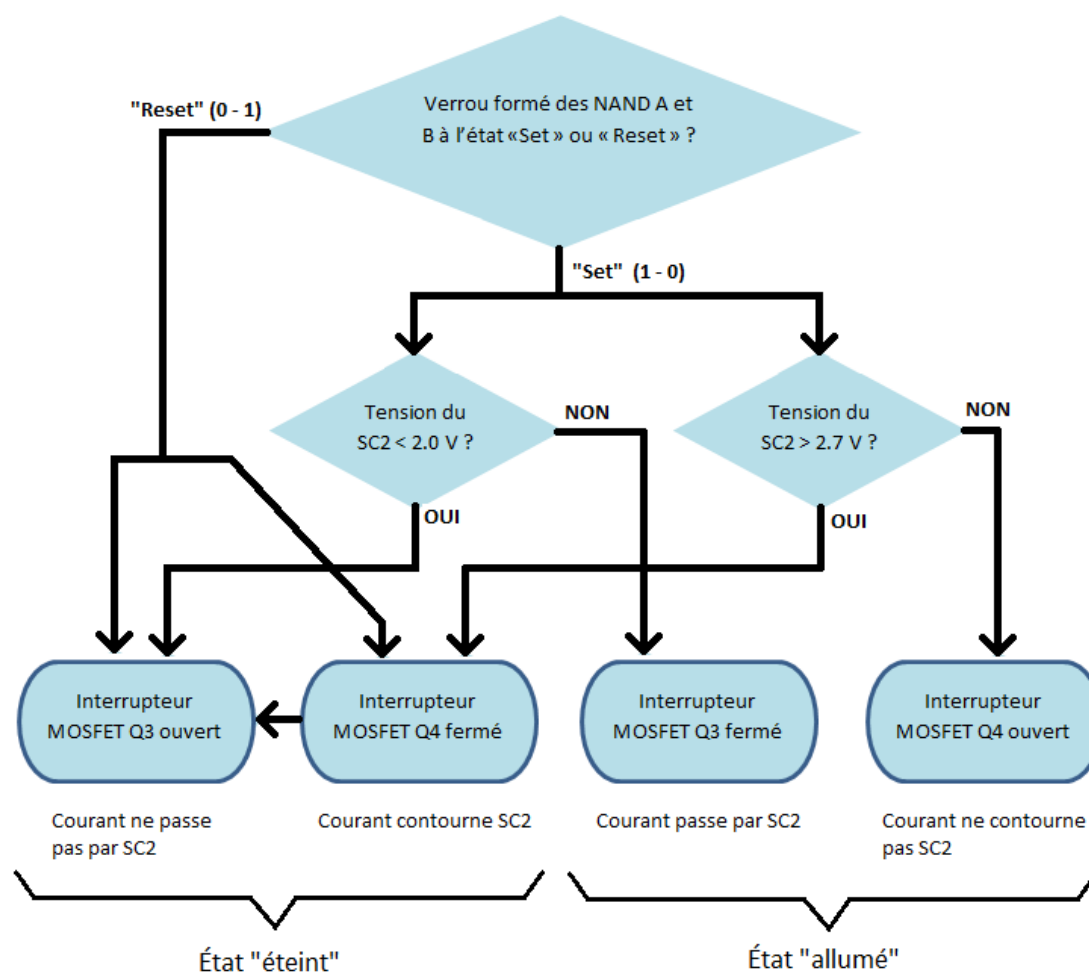


Figure 3.11 Algorithme équivalent du circuit logique pour actionner le supercondensateur SC2

3.5 Génération des tensions nécessaires au fonctionnement et diviseurs de tension

Étant donné l'importance que les MOSFETs du module de puissance se comportent comme de bons interrupteurs, et non pas comme des amplificateurs en régime linéaire, les tensions de grille doivent être suffisamment positives ou négatives selon le cas, pour que cela se réalise. Le circuit intégré ICL7660S doit remplir la tâche de fournir ces tensions appropriées.

En fait, le ICL7660S est un convertisseur à condensateurs commutés, tel que ce qui a été présenté dans la revue de littérature. Son fonctionnement de base peut être compris en examinant le circuit idéalisé de son fonctionnement à la figure 3.13. La tension entre V_{Entree} et la masse est transmise au condensateur C_1 à la fermeture des interrupteurs S1 et S3. Cette tension est ensuite transférée au condensateur C_2 par la fermeture des interrupteurs S2 et S4, coïncidant avec la réouverture des interrupteurs S1 et S3. La tension de sortie se trouve donc à être égale à $-V_{Entree}$.

L'ajout de diodes et de condensateurs formant des pompes de tension additionnelles permet d'obtenir les tensions V_{DD2} de l'ordre de +10.4 V et V_{SS2} d'environ -6.8 V par rapport à la référence locale.

Le diagramme de fonctionnement idéalisé du régulateur de tension Shunt NCP100 est présenté à la figure 3.14. Un comparateur s'assure que la tension à la broche R du NCP100 ne dépasse pas la valeur d'une référence interne de 0.698 V. Si il y a dépassement, un interrupteur court-circuite l'anode et la cathode, contribuant à maintenir la tension à une valeur donnée. En branchant le NCP100 tel qu'à la figure 3.15, le diviseur de tension formé des résistances R1 et R2 fera en sorte que la tension entre l'anode et la cathode corresponde à :

$$V_{Sortie} = V_{Ref} \left(1 + \frac{R1}{R2}\right). \quad (3.1)$$

Le condensateur C_L contribue à lisser la tension de sortie. Les valeurs de R1 de 30K et R2 de 100K produisent une tension régulée à 0.9 V, tel que calculé selon l'équation 3.1. Comme la cathode est branchée à la référence de masse locale, la valeur de la tension à l'anode se

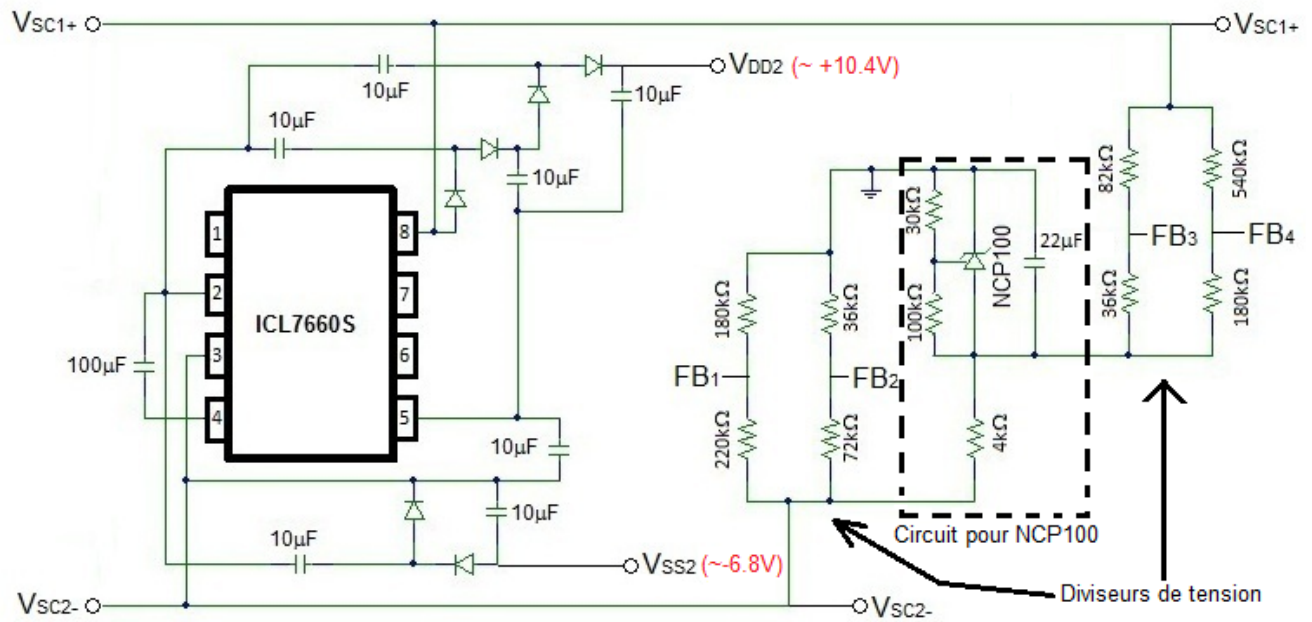


Figure 3.12 Le circuit intégré ICL7660S et les diviseurs de tension

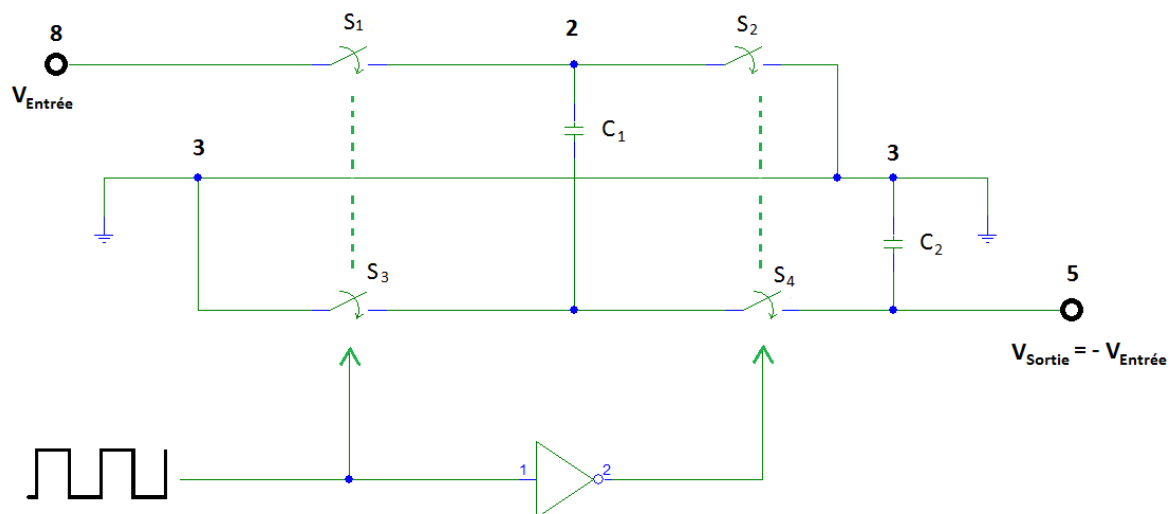


Figure 3.13 Circuit idéalisé du régulateur de tension ICL7660S

trouve donc à être de -0.9 V . Cette valeur sert de référence pour les comparateurs LP339.

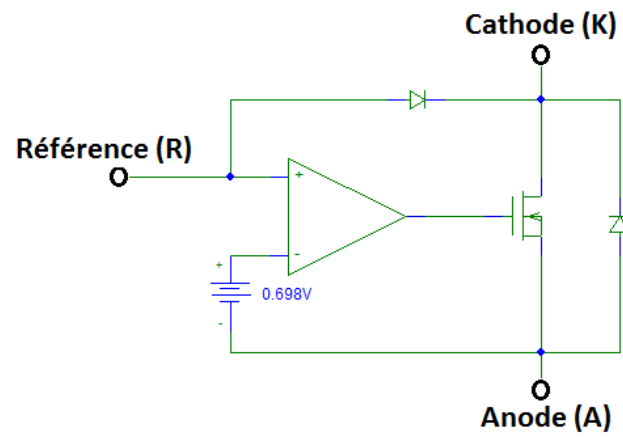


Figure 3.14 Circuit idéalisé du régulateur ajustable de tension Shunt NCP100

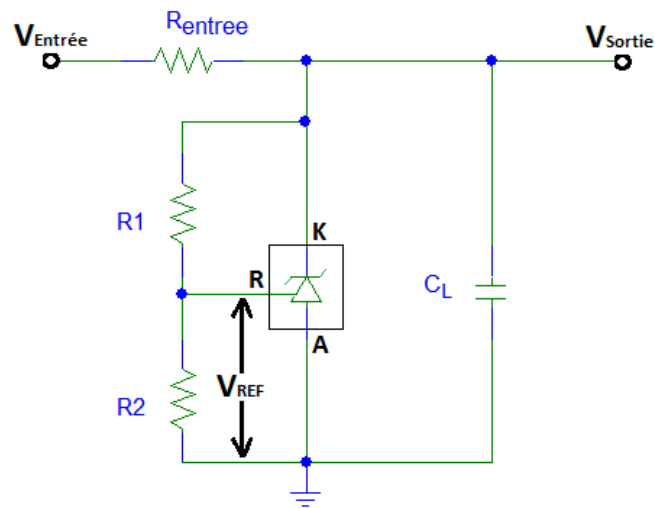


Figure 3.15 Branchement du régulateur de tension ajustable Shunt NCP100

Les quatres diviseurs de tensions serviront à déterminer si les tensions des deux supercondensateurs sont à l'intérieur des limites établies, soit :

- Le signal FB1 atteint -0.9 V si la tension de SC2 tombe à -2.0 V ;
- Le signal FB2 atteint -0.9 V si la tension de SC2 monte à -2.7 V ;
- Le signal FB3 atteint 0 V si la tension de SC1 tombe à +2.0 V ;
- Le signal FB4 atteint 0 V si la tension de SC1 monte à + 2.7 V

Ces signaux FB1 à FB4 serviront de critère aux comparateurs LP339 afin de déterminer si les contraintes des tensions des supercondensateurs sont respectées. Si elles ne le sont pas, le circuit logique réagira en actionnant les interrupteurs formés par les MOSFETs du module de puissance de façon à rectifier la situation.

3.6 Conclusion sur les concepts et schémas

Le circuit étudié repose sur le concept d'un supercondensateur commuté et commandé par un microcontrôleur. Le coeur du concept réside dans le circuit du module de puissance. Le principe directeur du design du module de puissance est de toujours fournir un chemin pour le courant, tout en évitant les possibilités de court-circuit. Cela rend possible la création d'un convertisseur dit universel. Un circuit de commande et de protection présent dans chacun des modules permet de traiter les commandes reçues du microcontrôleur, ainsi que de s'assurer que les tensions des supercondensateurs ne dépassent pas certaines valeurs critiques. L'implémentation informatique de ces concepts est présentée au chapitre suivant.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION DU CONCEPT

La première étape en vue de la réalisation du concept a été de modéliser le fonctionnement du module à l'aide de l'environnement Simulink de Matlab. Le but de cette modélisation étant de vérifier la logique de commande et de protection, certaines composantes ont été représentées par des modèles simplifiés et idéaux.

4.1 Modélisation des MOSFETs

Par exemple, les transistors MOSFETs ont été modélisés comme étant des interrupteurs idéaux dont la réponse est fonction de la tension mesurée à la grille. Cette modélisation simplifiée est illustrée aux figures 4.1a et 4.1b.

Le schéma général du circuit apparaît à la figure 4.3 et le détail de la section de commande et de protection à la figure 4.4 .

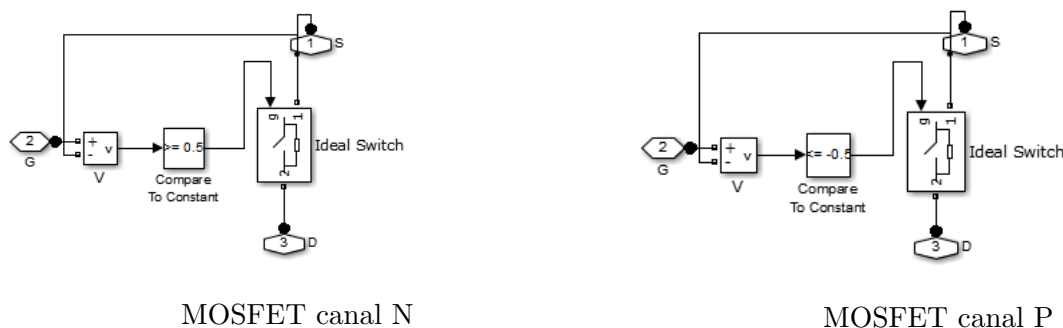


Figure 4.2 Modélisation idéalisée des MOSFETs

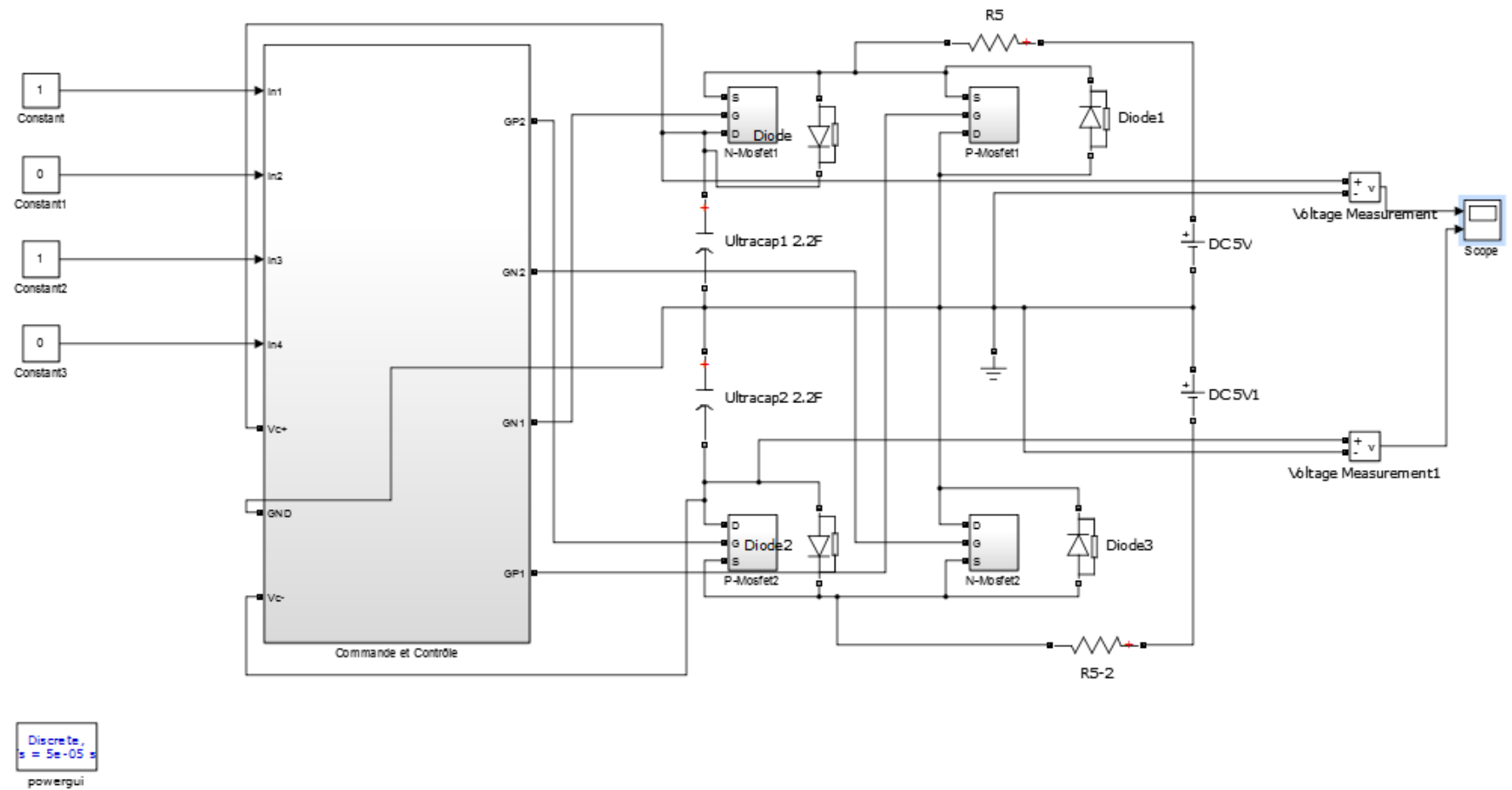


Figure 4.3 Circuit d'un module

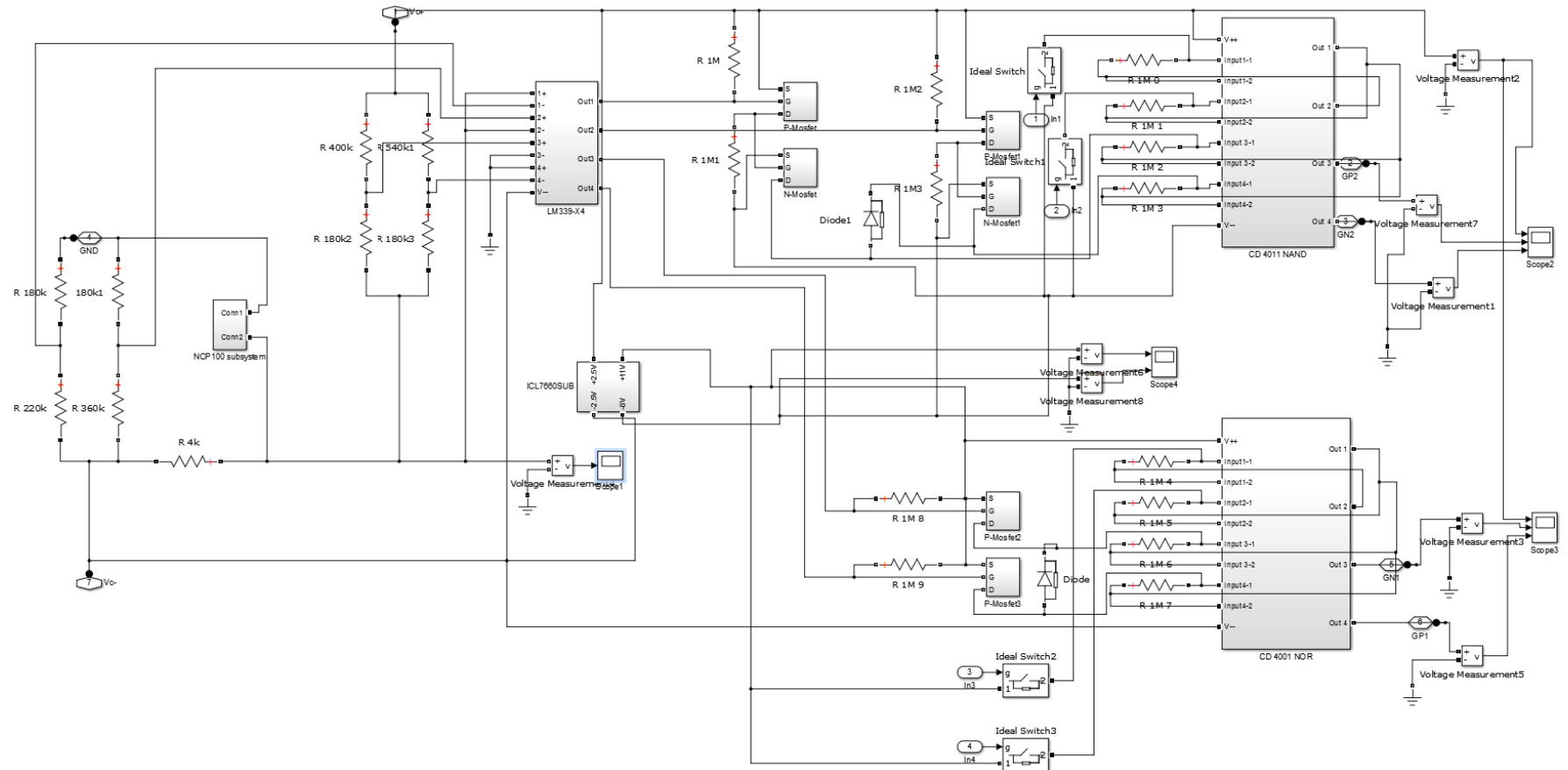


Figure 4.4 Sous-circuit de commande et de protection

4.2 Sous-circuits générateurs de tensions et de logique

Par souci de simplifier la présentation du sous-circuit de commande et de protection, la section de circuit générant les tensions de $+10.4\text{ V}$ et de -6.8 V nécessaires au bon fonctionnement des grilles des MOSFETs de puissance a été créée dans un sous-système. Ce sous-système est illustré à la figure 4.5. Ce circuit modélise essentiellement le branchement du circuit intégré ICL7660S qui fût présenté au chapitre précédent à la figure 3.12. Le fonctionnement du circuit intégré ICL7660S est lui-même modélisé dans le sous-système illustré à la figure 4.6. Ce modèle réplique le circuit de fonctionnement idéalisé présenté au chapitre précédent à la figure 3.13.

La section du circuit générant la référence de tension de -0.9 V a également été représentée dans un sous-circuit, illustré à la figure 4.7. Le fonctionnement du circuit intégré régulateur de tension NCP100 est quant-à-lui modélisé dans le sous-système illustré à la figure 4.8. Ce modèle réplique le circuit de fonctionnement idéalisé du NCP100 présenté au chapitre précédent à la figure 3.14.

Les portes NOR et NAND quadruples CD4001 et CD4011 ont été modélisées par des portes logiques idéales NON-OU et NON-ET respectivement, dont les sorties VRAIES donnent une tension V_{++} et les sorties FAUSSES une tension de V_- . La modélisation de la porte NON-OU quadruple CD4001 est illustrée à la figure 4.9 et celle de la porte NON-ET quadruple CD4011 à la figure 4.10.

4.3 Résultats

Les résultats obtenus par cette modélisation montrent que la logique de commande et de protection produit la réponse escomptée. En effet, la figure 4.11 montre que la tension aux bornes des supercondensateurs est limitée à 2.7 V lors d'une recharge à partir d'une source de 5 V passant par une résistance de 5 ohms , pour chacun des deux étages du module. La figure 4.12 montre quant-à-elle que le circuit de protection empêche la tension de tomber sous les 2.0 V lorsque les supercondensateurs se déchargent en alimentant une charge de 5 ohms chacun.

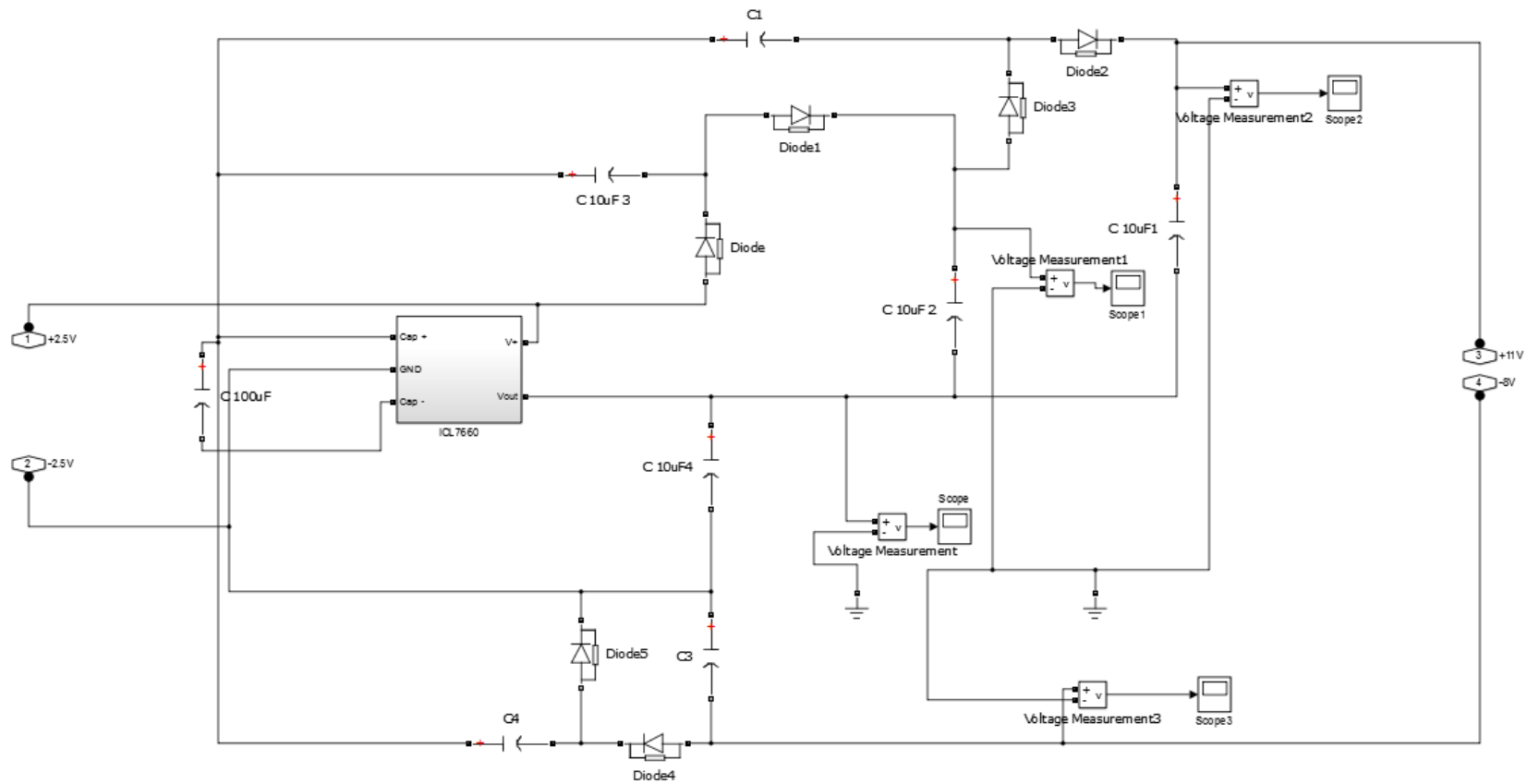


Figure 4.5 Sous-circuit régulateur de tensions utilisant le ICL7660S

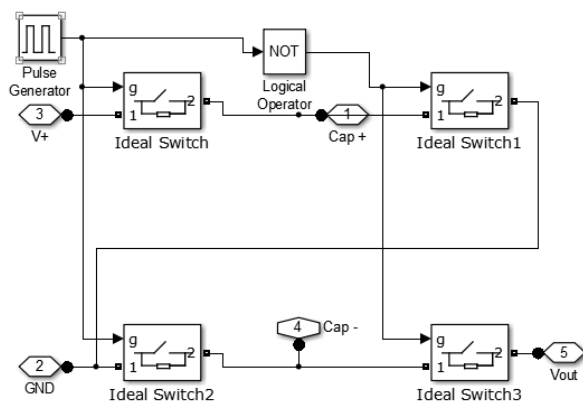


Figure 4.6 Modélisation du circuit intégré ICL7660S

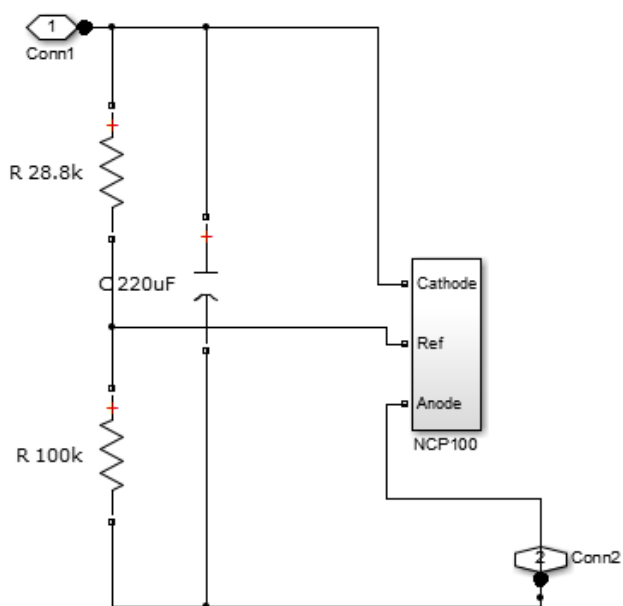


Figure 4.7 Sous-circuit créant une tension de référence de -0.9V utilisant le NCP100

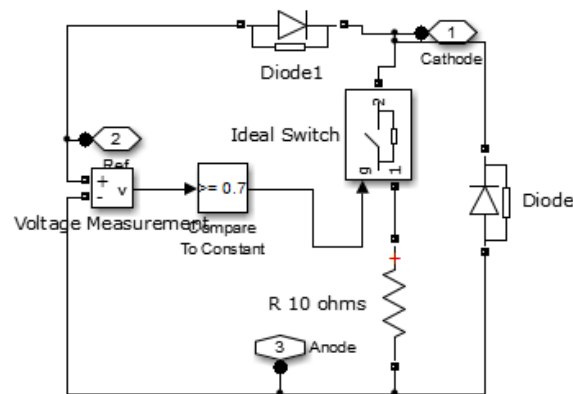


Figure 4.8 Modélisation du circuit intégré NCP100

4.4 Conclusion sur la modélisation du concept

Le but de la modélisation était de vérifier le bon fonctionnement de la logique de commande et de protection des modules. L'utilisation de modèles simplifiés et idéaux de plusieurs composantes était suffisante pour atteindre cet objectif. Cela a permis de simuler les défauts qui se produiraient si le microcontrôleur omettait d'empêcher que la tension dans un des supercondensateur ne franchisse les limites de sécurité établies. Les résultats obtenus montrent que la logique de commande et de protection accomplit cette tâche correctement.

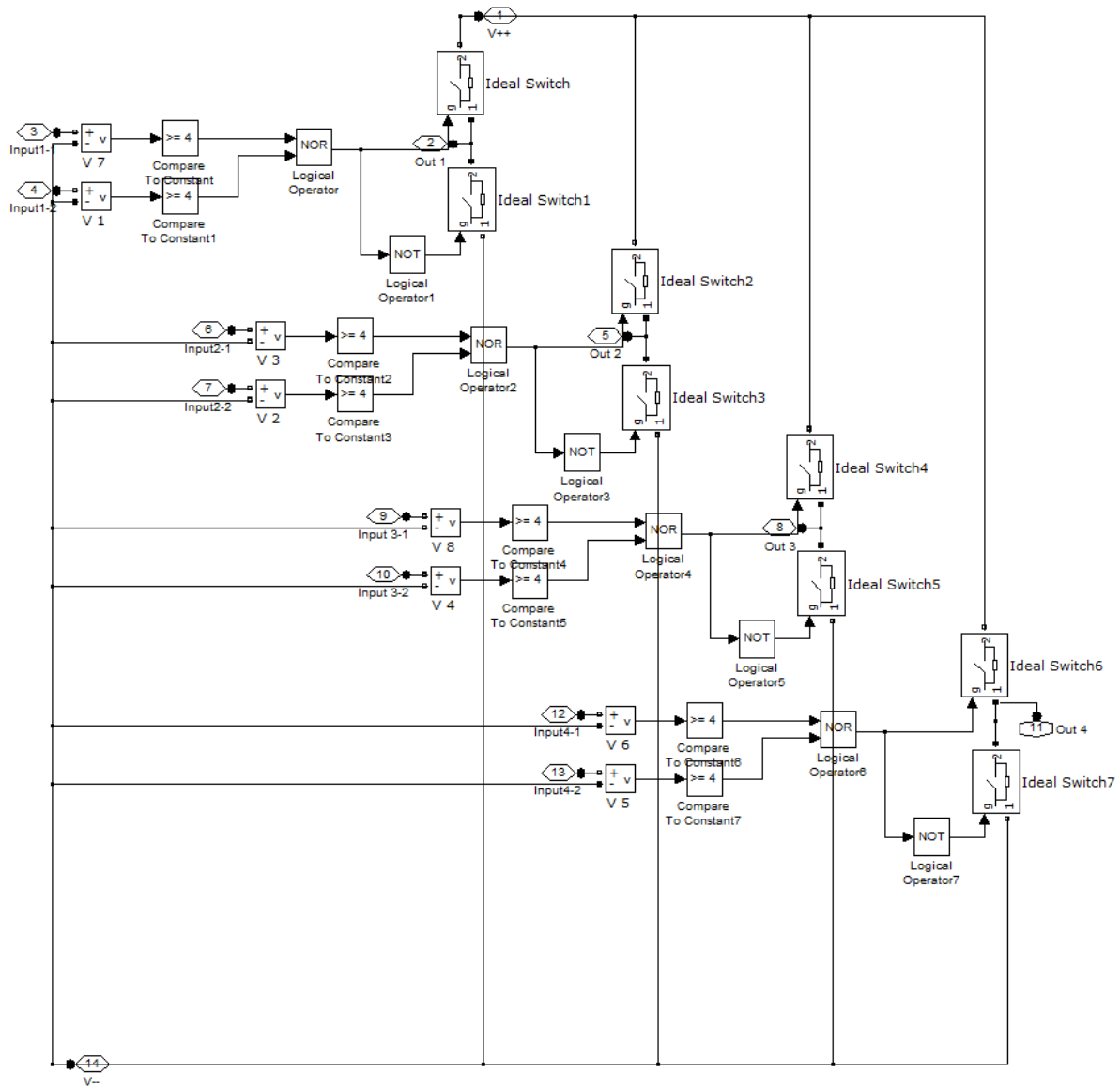


Figure 4.9 Modélisation du circuit intégré portes NOR quadruple CD4001

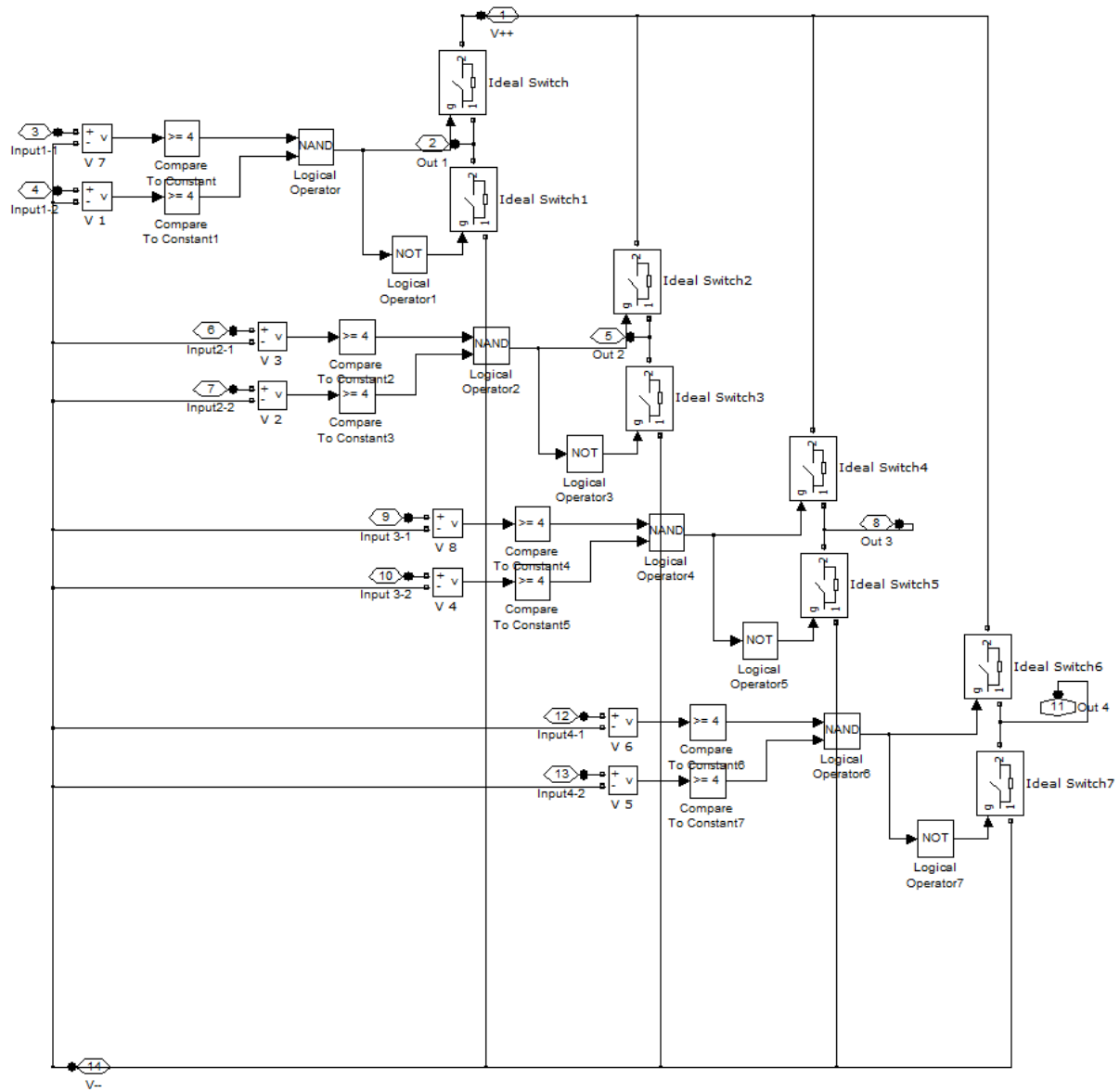


Figure 4.10 Modélisation du circuit intégré portes NAND quadruple CD4011

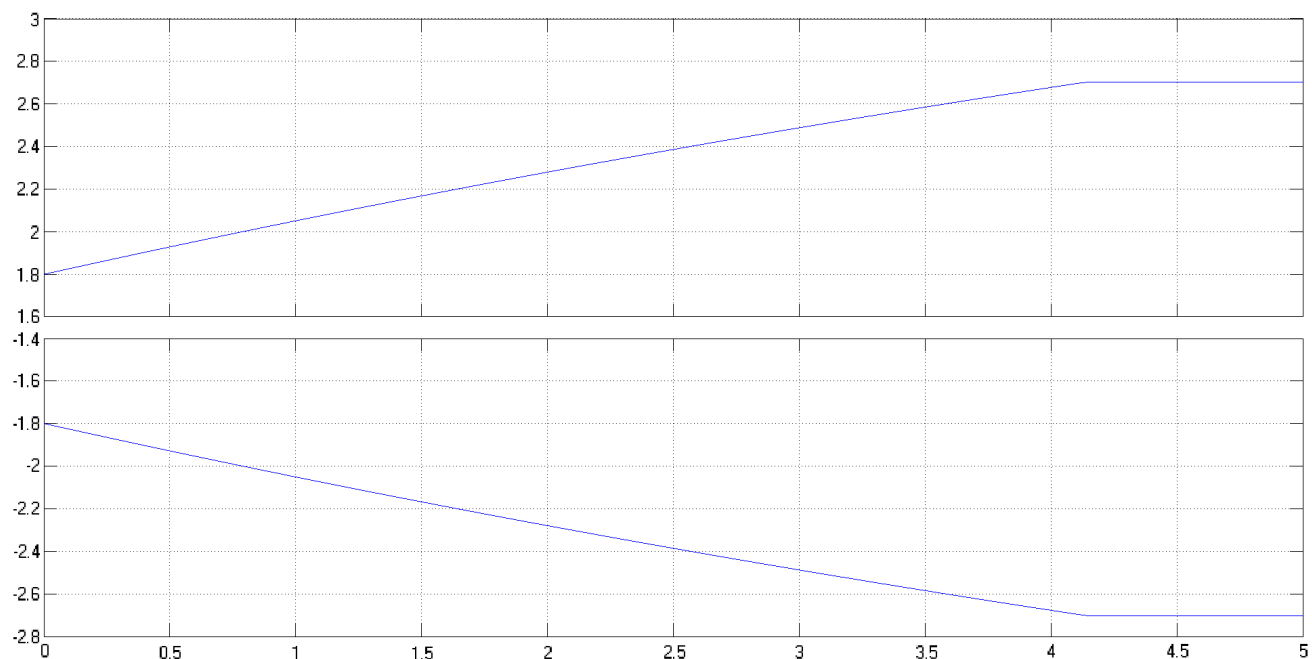


Figure 4.11 Résultat du blocage de la tension à 2.7 volts lors de la recharge des deux supercondensateurs

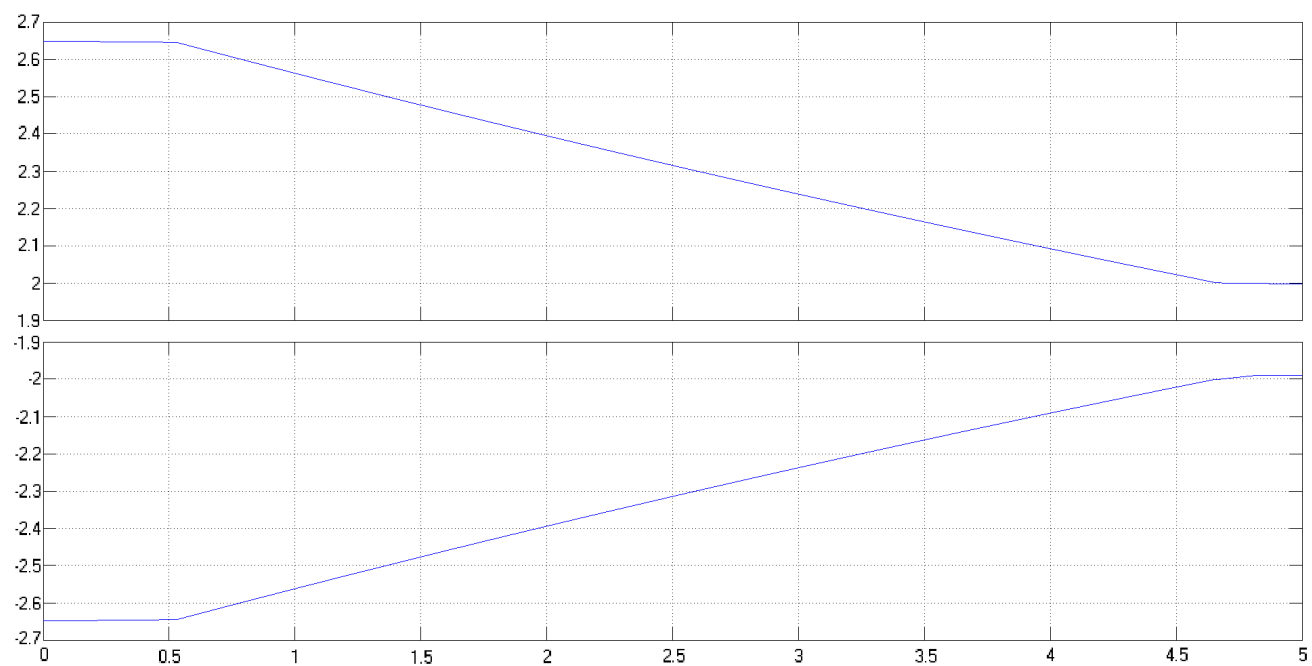


Figure 4.12 Résultat du blocage de la tension à 2.0 volts lors de la décharge des deux supercondensateurs

CHAPITRE 5

MISE EN OEUVRE ET TEST DU CONCEPT

Les plans présentés au chapitre trois ont servi à développer des prototypes de l'invention. Tout d'abord, un prototype a été implanté sur un breadboard afin de procéder à des essais de bon fonctionnement, tels qu'énumérés dans le protocole de la section qui suit cette introduction. Une fois que le bon fonctionnement du concept de base a été vérifié, un design de prototype sur PCB a été élaboré à l'aide du logiciel EagleCad. Vingt unités prototypes ont été réalisées, dont seize ayant un module de puissance gravé sur une plaque d'un grade de deux onces de cuivre par pouce carré, permettant de tolérer de plus forts courants. Neuf de ces unités ont servi à l'élaboration de convertisseurs formés de trois branches d'unités en série. Cette topologie permet de réaliser pratiquement n'importe quel type de convertisseur. Des convertisseurs DC/DC ont été réalisés pour faire la preuve que ce concept fonctionne.

5.1 Protocole de test du circuit de base

Objectif : Montrer que le circuit de protection du module prévient que la tension aux bornes des supercondensateurs ne dépasse 2.7 V ou ne tombe sous 2.0 V, ainsi que de vérifier que la section logique permet de maîtriser l'état du module.

Matériel requis :

- Un module de stockage d'énergie
- Une source de tension DC variable
- Un multimètre

Méthode : La méthode ci-dessous est décrite selon l'hypothèse que l'on teste l'étage de tension positive (p/r au point neutre « ground ») du module. On doit répéter ces étapes pour l'étage négatif, en remplaçant $V+$ par $V-$, $SC1+$ par $SC2-$, et les tensions limites par -2.0 V et -2.7 V. Il est important de noter que le supercondensateur de l'étage qui n'est pas testé doit présenter une tension suffisante pour alimenter le circuit de protection.



Figure 5.1 Photographie d'un module

1) Test en mode « recharge des supercondensateurs »

a) Section logique en état « set » : L'entrée de l'optocoupleur correspondant au supercondensateur à recharger est établie à un niveau logique 1 – 0. Le connecteur correspondant au noeud entre les deux supercondensateurs (« ground ») est mis à la terre et une tension supérieure à 2.7 V est appliquée à la borne $V+$ du circuit. La tension aux bornes du supercondensateur correspondant (entre $SC1+$ et « ground ») devrait croître jusqu'à 2.7 V et se stabiliser à ce niveau sans le dépasser.

b) Section logique en état « reset » : L'entrée de l'optocoupleur correspondant au supercondensateur à recharger est établie à un niveau logique 0 – 1. Le connecteur correspondant au noeud entre les deux supercondensateurs (« ground ») est mis à la terre et une tension est appliquée à la borne $V+$ du circuit. En supposant que le condensateur était déchargé au départ, la tension aux bornes de celui-ci doit rester quasi-nulle, puisqu' il ne doit pas se recharger, et ce, peu importe la valeur de tension appliquée.

c) Section logique en état « hold » après « set » : L'entrée de l'optocoupleur correspondant au supercondensateur à recharger est d'abord établie à un niveau logique 1 – 0 pour un bref moment, et puis à 0 – 0 par la suite. Répéter l'étape a). Les résultats doivent être les mêmes.

d) Section logique en état « hold » après « reset » : L'entrée de l'optocoupleur correspondant au supercondensateur à recharger est d'abord établie à un niveau logique 0 – 1 pour un bref moment, et puis à 0 – 0 par la suite. Répéter l'étape b). Les résultats doivent être les mêmes.

2) Test en mode « alimentation d'une charge »

a) Section logique en état « set » : L'entrée de l'optocoupleur correspondant au supercondensateur à recharger est établie à un niveau logique 1 – 0. Une résistance (100 ohms par exemple) est placée entre la borne $V+$ et la mise à la terre, ou $V-$ et la mise à la terre, selon l'étage du module à tester. Une tension est appliquée aux bornes du supercondensateur. Pour toute tension sous 2.0 V ou supérieure à 2.7 V, la tension aux bornes de la résistance doit être quasi-nulle. Pour des tensions appliquées variant entre 2.0 V et 2.7 V, la tension aux bornes de la résistance devra être proche de la valeur appliquée au supercondensateur, la différence

étant attribuable à la faible chute de tension du transistor mosfet faisant office d'interrupteur.

b) Section logique en état « reset » : L'entrée de l'optocoupleur correspondant au supercondensateur à recharger est établie à un niveau logique 0 – 1. Une résistance (100 ohms par exemple) est placée entre la borne $V+$ et la mise à la terre. Une tension est appliquée au bornes du supercondensateur. La tension aux bornes de la résistance doit rester quasi-nulle, et ce, peu importe la valeur de tension appliquée au niveau du supercondensateur.

c) Section logique en état « hold » après « set » : L'entrée de l'optocoupleur correspondant au supercondensateur à recharger est d'abord établie à un niveau logique 1 – 0 pour un bref moment, et puis à 0 – 0 par la suite. Répéter l'étape a). Les résultats doivent être les mêmes.

d) Section logique en état « hold » après « reset » : L'entrée de l'optocoupleur correspondant au supercondensateur à recharger est d'abord établie à un niveau logique 0 – 1 pour un bref moment, et puis à 0 – 0 par la suite. Répéter l'étape b). Les résultats doivent être les mêmes.

5.2 Concept de convertisseur à trois branches

5.2.1 Topologie et fonctionnement

La topologie choisie pour implanter un concept de convertisseur est constituée des trois branches parallèles de modules de puissance reliés en série. Des interrupteurs à l'extrémité de chacune des branches permettent de les mettre en contact soit avec la borne d'entrée ou la borne de sortie du convertisseur. Cette topologie est représentée à la figure 5.2 .

À tout moment, l'une des branches doit être en contact avec la borne d'entrée et une autre branche en contact avec la borne de sortie. La tension générée par les condensateurs se trouvant branchés en série doit correspondre à la tension d'entrée ou de sortie selon le cas. La troisième branche servira de tampon afin d'éviter une discontinuité de tension ainsi que pour réduire les émissions électromagnétiques causées par de brusques variations de tension en entrée ou en sortie. La lecture des tensions de chaque supercondensateur et la commutation des supercondensateurs se fait également pendant qu'une branche donnée se trouve dans cette position, c'est-à-dire ni branchée à l'entrée ou la sortie. Il y aura alternance entre ces trois fonctions pour chacune des trois branches afin que les condensateurs étant rechargés

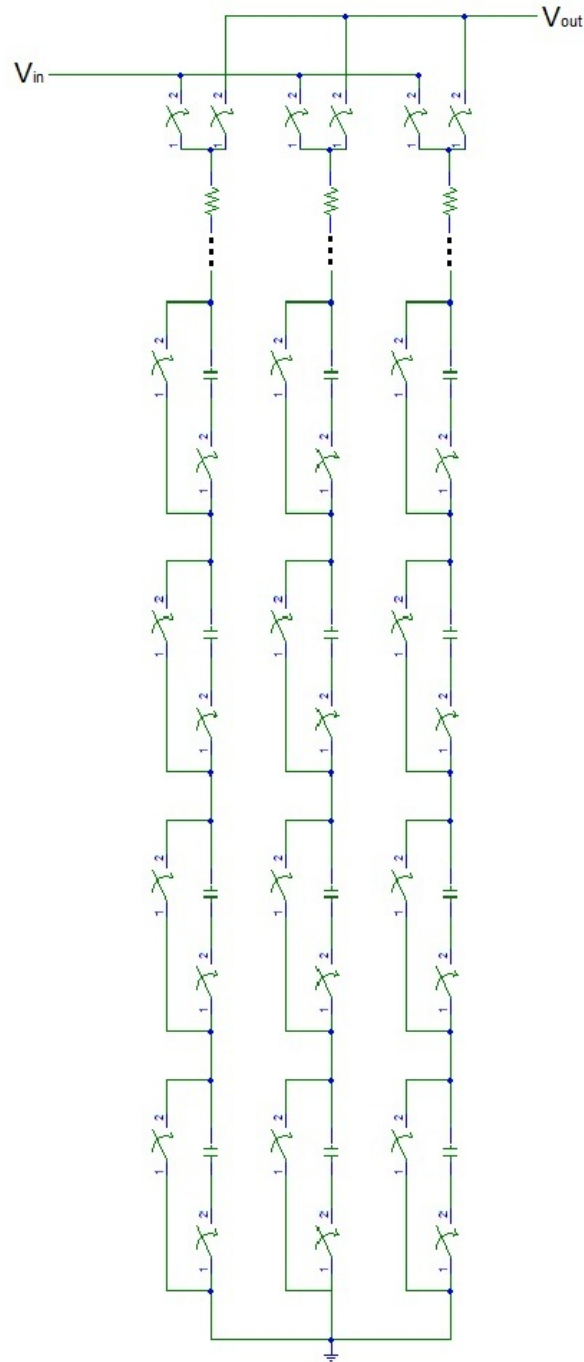


Figure 5.2 Topologie d'un convertisseur contenant trois branches en parallèle de modules de puissance reliés en série entre eux

à un instant donné puissent se trouver en position de fournir du courant à la charge à un moment ultérieur.

L'interface entre le microcontrôleur dsPic30F4013 et les optocoupleurs de chacun des modules se fait par le biais d'une matrice qui est alimentée par les sorties de deux démultiplexeurs, tel qu'illustré à la figure 5.3. Pour que la sortie d'un optocoupleur soit activée, donc que l'interrupteur soit fermé, il faut que la tension fournie par le bus de position y soit positive et que la tension fournie par le bus de position en x soit un zéro logique. En effet, les anodes des optocoupleurs sont reliés aux bus en y et les cathodes sont reliés aux bus en x. Comme la table de fonction du démultiplexeur 74154 montre que celui-ci fournit un zéro logique (Low) à la broche de sortie désignée par la valeur hexadécimale en entrée, et des 1 logiques (High) pour toutes les autres broches, des inverseurs 7404 doivent être utilisés pour le démultiplexeur qui traite les bus de position y.

Le microcontrôleur détermine à tout moment à quelle tension doit se trouver la branche en contact avec l'entrée et la tension de la branche en contact avec la borne de sortie. Le microcontrôleur peut donc moduler ces tensions dans le temps, de façon à créer des formes d'ondes diverses, avec des fréquences ajustables, tant en entrée qu'en sortie du convertisseur. C'est en ce sens que ce design de convertisseur peut être considéré comme étant «universel». Le type de convertisseur est entièrement déterminé par le programme qui est enregistré dans le microcontrôleur.

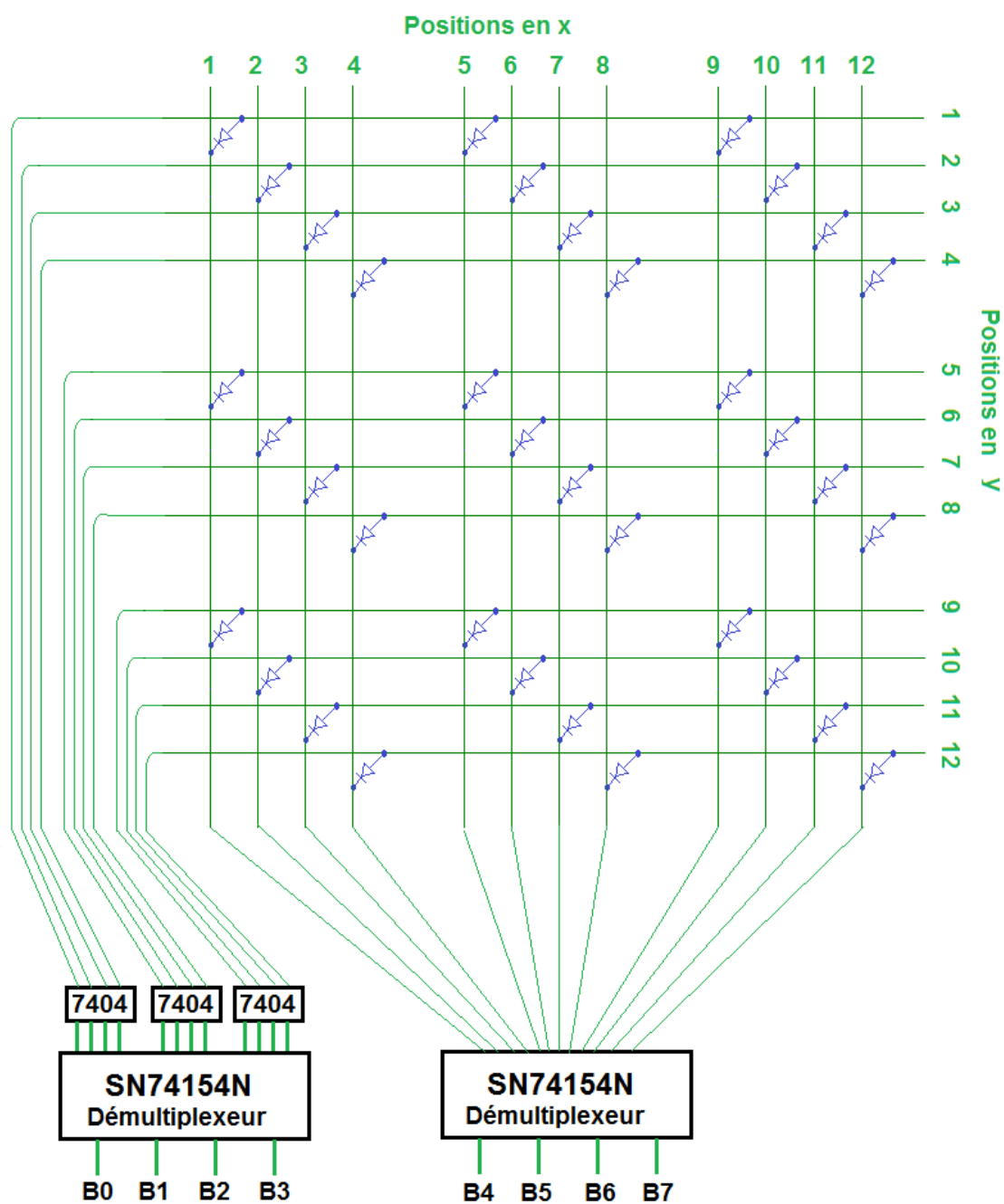


Figure 5.3 Matrice de l'interface entre le port B du microcontrôleur dsPic et les optocoupleurs

5.2.2 Transistors BJT utilisés comme interrupteurs entre les trois branches pour convertisseur DC/DC

Les transistors BJT sont utilisés comme interrupteurs dans ce circuit de test. Les MOSFETs de puissance ont une diode entre le drain et la source, ce qui présente un problème pour la tâche à accomplir ici, car cela permettrait une interférence (lorsque le MOS est ouvert) entre la borne de sortie et la branche tampon qui est à une tension plus basse. Les BJT ne présentent pas cet inconvénient, et le fait que nous en avons sous la main explique leur utilisation dans le montage de test. Par contre, la commande du transistor au moyen d'une grille isolée physiquement du drain et de la source est préférable à la jonction base-émetteur du BJT. Pour cette raison, la composante idéale dans le futur serait le IGBT, qui se comporte comme un MOSFET au niveau de sa commande, et qui ne possède pas de diode en parallèle. La fonction que reproduira le convertisseur dépend donc uniquement de l'algorithme programmé dans le microcontrôleur qui actionnera le circuit. Ici, le microcontrôleur utilisé sera un dsPic30F4013 de la compagnie Microchip, placé dans un PCB de test dsPicDem2. Le langage de programmation utilisé est une version de Forth nommée FlashForth.

5.2.3 Fonctionnement du langage Forth

La programmation en langage Forth repose sur la création de “mots”, c'est-à-dire de nouvelles commandes définies par le programmeur. Ces “mots” utilisent comme intrant des nombres mis dans la “pile”. La pile est une région de la mémoire de l'ordinateur dédiée à enregistrer des nombres selon une séquence dernier entré, premier sorti (LIFO, ou “Last In First Out” en anglais) . Les “mots” prennent donc les premiers nombres sur la “pile”, les traitent selon la fonction du “mot”, et remettent le résultat sortant, un ou plusieurs nombres, sur le dessus de la “pile”. Dans un programme Forth, on commence donc par définir des “mots” qui exécuteront des fonctions de base, en progressant vers des opérations plus complexes. Le dernier “mot” créé devrait utiliser les autres “mots” définis préalablement pour constituer le programme principal comme tel. D'autres choix de langages sont évidemment possibles, mais c'est le langage Forth qui a été utilisé en raison de l'historique du projet.

5.2.4 Algorithme de fonctionnement pour un convertisseur DC/DC avec transistors BJT utilisés comme commutateurs entre les trois branches

Suivant la philosophie de programmation en Forth, le programme est ici présenté sous forme de description de la fonction des "mots" créés, commençant par les fonctions de base, et terminant par le programme lui-même. Un glossaire technique et plus formel des mots Forth créés pour le programme se trouve en annexe B.

allumer (x,y) : brancher le supercondensateur de la branche x et de position y en série avec la branche.

eteindre (x,y) : débrancher le supercondensateur de la branche x et de position y de la branche.

reset : remettre toutes les sorties des deux démultiplexeurs à 0.

lireadc : effectuer une lecture de tension à l'aide du ADC du microcontrôleur.

tensions : créer une matrice des tensions lues pour chacun des supercondensateurs, selon leurs positions x et y.

ordonner4 : algorithme "bubblesort" qui classe les supercondensateurs d'une branche donnée selon la valeur de leur tension, en ordre croissant.

eteindrecolonne : débrancher tous les supercondensateurs d'une branche x, afin de ramener la tension aux bornes de celle-ci à 0.

recharge3 : branche les supercondensateurs ayant les plus faibles tensions en série pour former la branche qui sera rechargée par la source en entrée. Le nombre de supercondensateurs est déterminé par la variable nbentree, établie par la tension requise à l'entrée du convertisseur.

sortie3 : branche les supercondensateurs ayant les tensions les plus élevées en série pour former la branche qui alimentera la charge en sortie. Le nombre de supercondensateurs est déterminé par la variable nb sortie, établie par la tension requise à la charge.

abc3 : La branche A est branchée à l'entrée. La branche B est la branche tampon. La branche C est branchée en sortie. La branche B est éteinte, puis les tensions de ses supercondensateurs sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche B est préparée pour passer

en sortie : ses supercondensateurs les plus chargés sont connectés en une branche ayant la tension désirée à la charge. Les BJT effectuent ensuite la commutation vers $acb3$, où C sera branche tampon et B est branchée en sortie.

$acb3$: La branche A est branchée à l'entrée. La branche C est la branche tampon. La branche B est branchée en sortie. La branche C est éteinte, puis les tensions de ses supercondensateurs sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche C est préparée pour passer en entrée : ses supercondensateurs les moins chargés sont connectés en une branche ayant la tension désirée à la source DC. Les BJT effectuent ensuite la commutation vers $cab3$, où C sera la branche en entrée et A est la branche tampon.

$cab3$: La branche C est branchée à l'entrée. La branche A est la branche tampon. La branche B est branchée en sortie. La branche A est éteinte, puis les tensions de ses supercondensateurs sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche A est préparée pour passer en sortie : ses supercondensateurs les plus chargés sont connectés en une branche ayant la tension désirée à la charge. Les BJT effectuent ensuite la commutation vers $cba3$, où B sera branche tampon et A est branchée en sortie.

$cba3$: La branche C est branchée à l'entrée. La branche B est la branche tampon. La branche A est branchée en sortie. La branche B est éteinte, puis les tensions de ses supercondensateurs sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche B est préparée pour passer en entrée : ses supercondensateurs les moins chargés sont connectés en une branche ayant la tension désirée à la source DC. Les BJT effectuent ensuite la commutation vers $bca3$, où B sera la branche en entrée et C est la branche tampon.

$bca3$: La branche B est branchée à l'entrée. La branche C est la branche tampon. La branche A est branchée en sortie. La branche C est éteinte, puis les tensions de ses supercondensateurs sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche C est préparée pour passer en sortie : ses supercondensateurs les plus chargés sont connectés en une branche ayant la tension désirée à la charge. Les BJT effectuent ensuite la commutation vers $bac3$, où A sera branche tampon et C est branchée en sortie.

$bac3$: La branche B est branchée à l'entrée. La branche A est la branche tampon. La branche C est branchée en sortie. La branche A est éteinte, puis les tensions de ses supercondensateurs sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche A est préparée pour passer en entrée : ses supercondensateurs les moins chargés sont connectés en une branche ayant la

tension désirée à la source DC. Les BJT effectuent ensuite la commutation vers abc3, où A sera la branche en entrée et B est la branche tampon.

Et finalement, le programme principal se trouve sous le "mot" dcdc2, qui est une boucle répétant les 6 derniers mots dans l'ordre, jusqu'à ce qu'une condition de sécurité soit déclenchée (si un supercondensateur se trouve à une tension sous 2.0 volts ou au dessus de 2.7 volts) ou bien l'arrêt ordonné par l'utilisateur. Donc :

dcdc2 : répète dans l'ordre : abc3, acb3, cab3, cba3, bca3, bac3, jusqu'à une condition d'arrêt soit atteinte.

Pour illustrer le fonctionnement de ce programme, son organigramme est présenté à la figure 5.4 .

5.2.5 Convertisseur DC/DC unidirectionnel

L'utilisation de diodes plutôt que des transistors comme commutateurs entre les branches et les bornes d'entrée et de sortie résulte en un convertisseur DC/DC élévateur unidirectionnel. Il n'y a plus de commandes provenant du microcontrôleur pour effectuer les commutations. Celles-ci ne sont désormais déterminées que par la tension aux bornes de chacune des trois branches. Le circuit d'un tel système est présenté à la figure 5.5.

Une branche dont la tension est inférieure à la tension de la source à l'entrée se retrouve à être rechargée par celle-ci, et isolée de la borne de sortie. Une branche dont la tension est supérieure à la charge en sortie alimente cette dernière en courant, sans être en contact avec l'entrée. Et une branche dont la tension se trouve entre la tension de l'entrée et celle de la sortie est isolée des deux, donc en situation de branche tampon. La branche tampon sert également à mesurer les tensions de chaque supercondensateur. Cependant, la tension de cette branche ne peut descendre au même niveau ou plus bas que la tension d'entrée afin d'éviter une interférence de la source sur la tension de la branche tampon.

La stratégie pour mesurer les tensions est alors un peu différente de celle du système précédent. La méthode consiste à garder plusieurs supercondensateurs en série, et d'en additionner ou soustraire un à la fois afin de déterminer une tension par différence. Ce processus est au coeur de l'algorithme présenté ci-dessous.

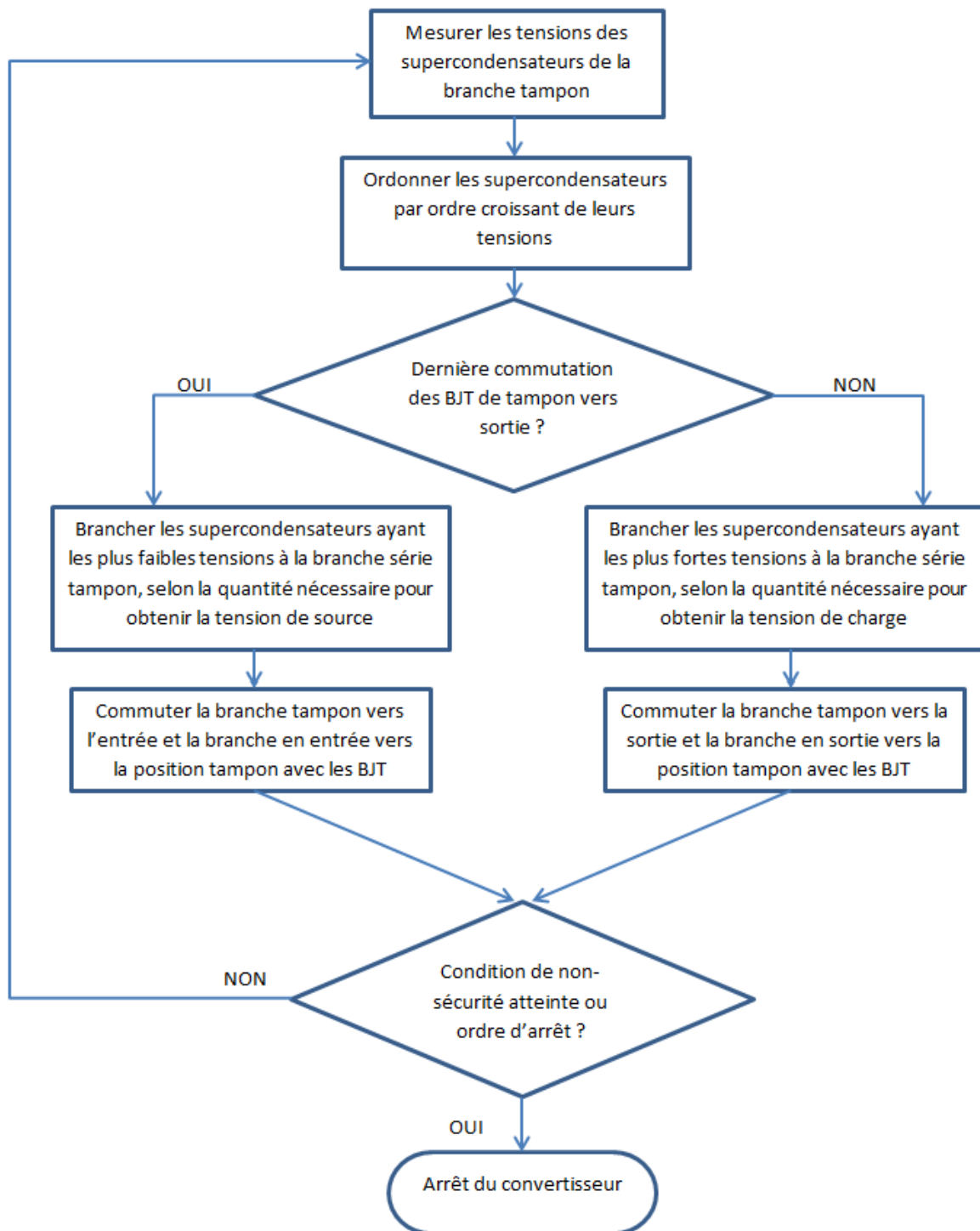


Figure 5.4 Organigramme du programme de convertisseur DC/DC utilisant des BJT comme commutateurs entre les branches

5.2.6 Algorithme de fonctionnement pour le convertisseur DC/DC unidirectionnel

Par souci de simplification, le système utilisé pour tester ce concept ne prend qu'un supercondensateur branché dans la branche d'entrée, et tous les supercondensateurs branchés en série dans la branche de sortie. Comme il y a 6 supercondensateurs par branche et qu'on estime la tension de chacun à environ 2.5 volts, il en résulte un convertisseur DC/DC élévateur de 2.5 volts vers 15 volts environ.

Comme précédemment, l'algorithme est présenté comme une définition de chacun des nouveaux "mots" créés dans Forth pour monter le programme. Son organigramme est ensuite illustré à la figure 5.6 .

tensddinit : Initiation du processus de mesure des tensions des supercondensateurs de la branche tampon. Les deux premiers supercondensateurs de la branche sont "allumés", et tous les autres "éteints".

tensdiod : Mesure des tensions de chacun des supercondensateurs. Un à un, les supercondensateurs sont allumés et les tensions sont obtenues par différences. Lorsqu'un supercondensateur est "allumé", un autre doit être "éteint" pour ne pas dépasser la tension à la borne de sortie. Le résultat est inscrit dans une matrice qui contient également les coordonnées de chacun des supercondensateurs. Les conditions de tensions maximales et minimales sont vérifiées pour la protection du circuit.

allumercolonne : "allume" tous les supercondensateurs d'une branche donnée.

recharged : n'allume que le supercondensateur ayant la tension la moins élevée de la branche tampon à être reliée à la borne d'entrée ultérieurement.

abcd : La branche A est branchée à l'entrée. La branche B est la branche tampon. La branche C est branchée en sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche tampon sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche B est préparée pour passer en sortie : ses supercondensateurs sont tous "allumés" l'un après l'autre afin d'atteindre la tension de la charge, ce qui mettra la diode en conduction avec la borne de sortie.

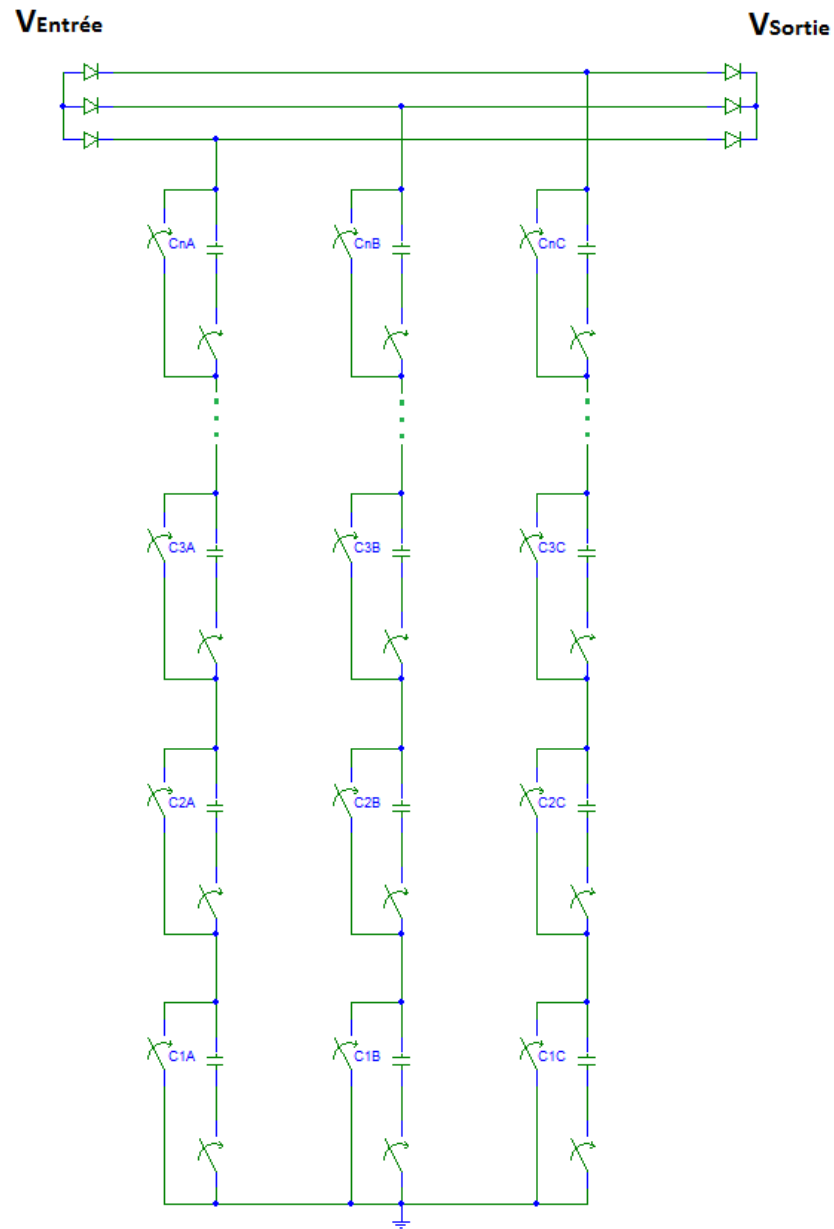


Figure 5.5 Circuit d'un convertisseur DC/DC à trois branches utilisant des diodes pour la commutation entre les branches et les bornes d'entrée et de sortie

acbd : La branche A est branchée à l'entrée. La branche C est la branche tampon. La branche B est branchée en sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche tampon sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche C est préparée pour passer en entrée : seul son supercondensateur le moins chargé est "allumé" afin d'atteindre la tension de la source, ce qui mettra la diode en conduction avec la borne d'entrée.

cabd : La branche C est branchée à l'entrée. La branche A est la branche tampon. La branche B est branchée en sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche tampon sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche A est préparée pour passer en sortie : ses supercondensateurs sont tous "allumés" l'un après l'autre afin d'atteindre la tension de la charge, ce qui mettra la diode en conduction avec la borne de sortie.

cbad : La branche C est branchée à l'entrée. La branche B est la branche tampon. La branche A est branchée en sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche tampon sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche C est préparée pour passer en entrée : seul son supercondensateur le moins chargé est "allumé" afin d'atteindre la tension de la source, ce qui mettra la diode en conduction avec la borne d'entrée.

bcad : La branche B est branchée à l'entrée. La branche C est la branche tampon. La branche A est branchée en sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche tampon sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche A est préparée pour passer en sortie : ses supercondensateurs sont tous "allumés" l'un après l'autre afin d'atteindre la tension de la charge, ce qui mettra la diode en conduction avec la borne de sortie.

bacd : La branche B est branchée à l'entrée. La branche A est la branche tampon. La branche C est branchée en sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche tampon sont évaluées puis classées en ordre croissant. La branche C est préparée pour passer en entrée : seul son supercondensateur le moins chargé est "allumé" afin d'atteindre la tension de la source, ce qui mettra la diode en conduction avec la borne d'entrée.

quickstart : définition des adresses des ports de sortie et initialisation de l'ADC du microcontrôleur.

Le programme principal est :

dcdiode4 : "quickstart" suivi de la séquence : abcd, acbd, cabd, cbad, bcad et bacd répétée jusqu'à ce qu'une condition de protection soit atteinte ou arrêt par l'utilisateur.

Les programmes Forth se trouvent à l'annexe A, et un glossaire des mots à l'annexe B.

5.3 Conclusion de la mise en oeuvre et test de l'invention

La topologie retenue pour la mise en oeuvre de convertisseurs comporte trois branches de supercondensateurs commutés en série. L'une des options emploie des transistors BJT comme commutateurs entre les branches et les bornes d'entrée et de sortie alors que la deuxième option emploie plutôt des diodes Schottky. Les résultats des tests suivent au chapitre suivant.

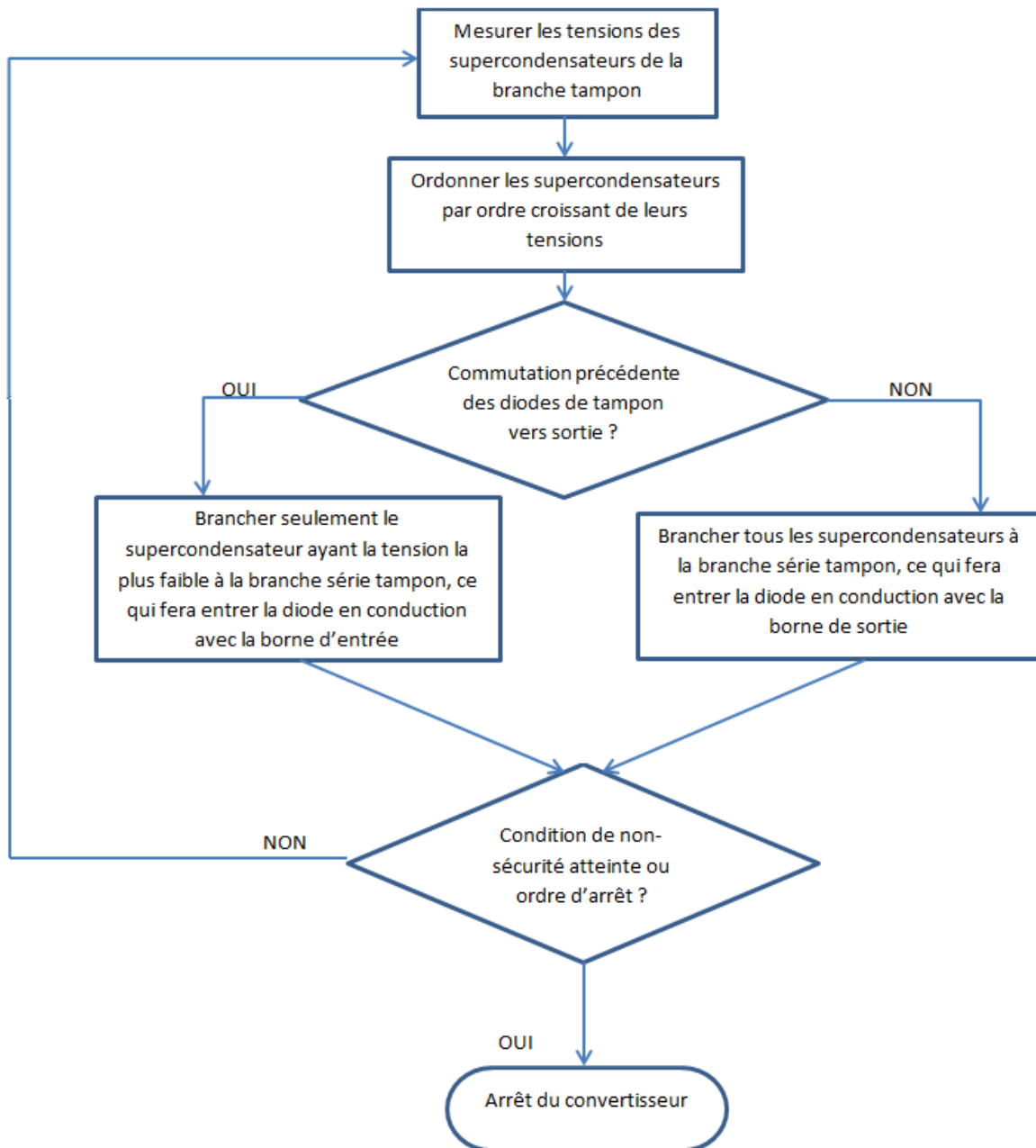


Figure 5.6 Organigramme du programme de convertisseur DC/DC utilisant des diodes comme commutateurs entre les branches et les bornes d'entrée et de sortie

CHAPITRE 6

RÉSULTATS

Les deux topologies décrites au chapitre précédent ont été assemblées et testées pour vérifier la faisabilité du concept de convertisseur basé sur l'invention dont traite ce mémoire. Les tests furent conduits à de très faibles fréquences de commutation, tel que permis par l'utilisation des supercondensateurs.

6.1 Tests sur le convertisseur utilisant des transistors BJT comme commutateurs

Les tests initiaux sur le montage utilisant les BJT ont été faits sans charge, afin de vérifier seulement si les tensions désirées étaient atteintes et stables en entrée et en sortie du convertisseur DC/DC. La figure 6.1 montre les tensions en entrée et en sortie pour un convertisseur ayant un rapport de tension 5 :2. La tension des supercondensateurs étant établie à environ 2.4 V, ce convertisseur transforme donc une entrée de 4.8 V vers une sortie à 12 V environ. Le résultat est fidèle à ce qui est prévu, avec des tensions stables dans le temps.

Les tests avec charge ont révélé une faiblesse du montage utilisé. Les optocoupleurs alimentant les bases des transistors BJT n'étant pas capables de conduire suffisamment de courant, la tension en sortie s'est avérée significativement réduite par rapport à la valeur théorique, et la tension n'est plus lisse, mais saccadée lors des commutations, bien que le courant ne soit que de l'ordre de 125 mA. Dans ce cas-ci, la rapport de conversion de tension théorique était de 3 :2, c'est-à-dire une tension d'entrée d'environ 4.8 V pour une sortie d'environ 7.2 V. Le graphique des tensions obtenues est présenté à la figure 6.2 .

6.2 Test du convertisseur utilisant des diodes Schottky comme commutateurs

Le convertisseur utilisant les diodes Schottky était en mesure de tolérer des courants plus élevés que celui avec les BJT avant que la qualité de sa sortie ne soit affectée. En effet, la mesure de courant de sortie lors du test effectué était d'environ 1 A. Le graphique des tensions

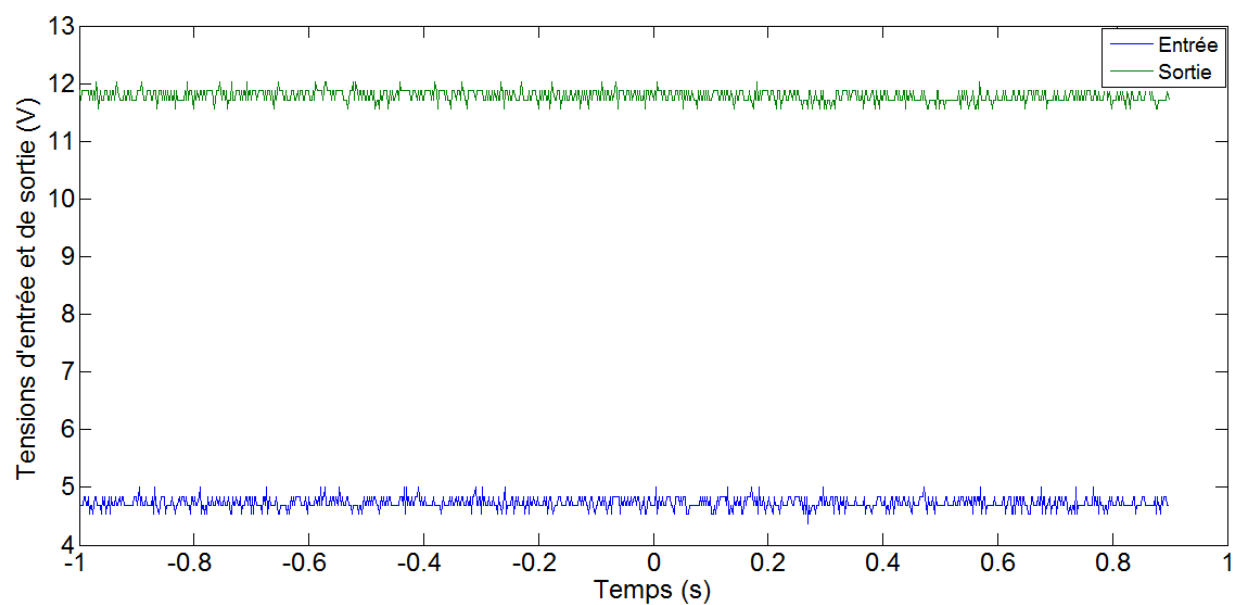


Figure 6.1 Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur à BJT sans charge

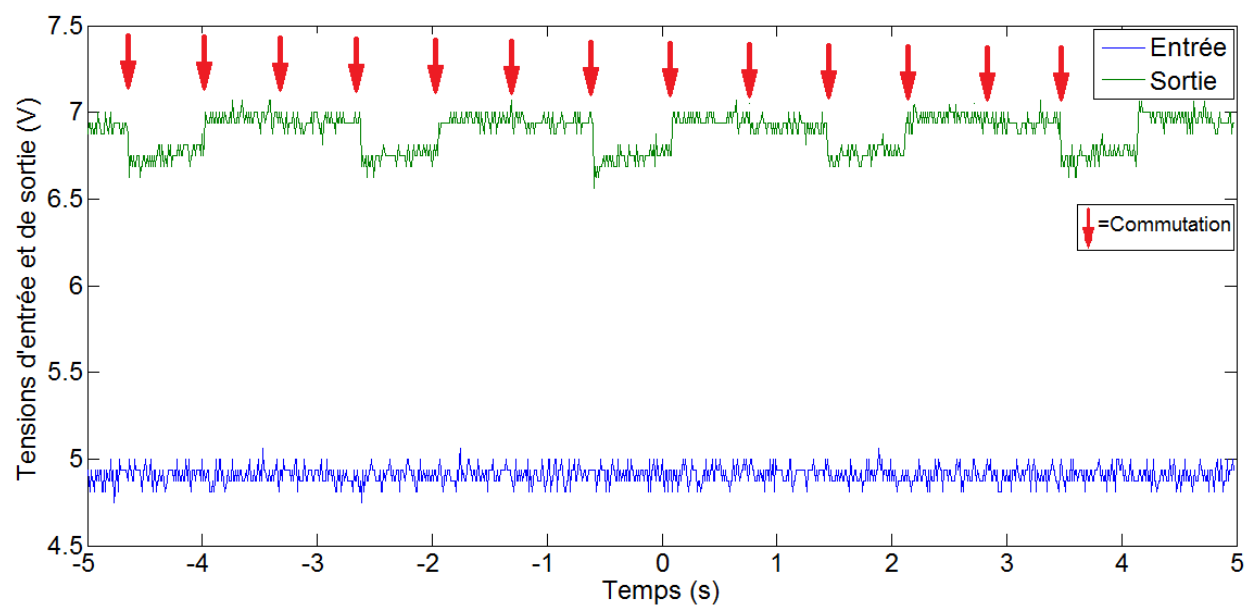


Figure 6.2 Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur à BJT avec charge de 56 ohms

d'entrée et de sortie est présenté à la figure 6.3. Par contre, il y a un problème avec la tension d'entrée. Ce convertisseur devait théoriquement convertir 2.35 V vers 14.1 V en sortie. Or, la tension que doit fournir la source en entrée dépasse les 4 V pour n'obtenir que 2.35 V aux bornes de la branche en entrée. Cet écart semble causé par des pertes ohmiques se produisant dans le montage de test sur breadboard et par la chute en tension des diodes Schottky. En effet, des mesures montraient que la tension aux bornes des branches de modules en position «entrée» était bien d'environ 2.35 V. L'origine de la chute de tension de 1.65 V observée ici n'a pas pu être établie en détails dans le temps alloué pour la complétion de ce projet. Des mesures additionnelles, combinées à l'utilisation de composantes mieux adaptées à la tâche de commutation (IGBT) et d'un grossissement du calibre des conducteurs de puissance devront être effectuées dans la suite de ce projet afin d'établir plus clairement la source des pertes dans le circuit d'interfaçage avec la source et la charge.

6.3 Possibilité de générer des formes d'onde diverses

Bien que les tests effectués se sont limités à de la conversion DC/DC, le concept de l'invention permet de générer diverses formes d'ondes, suivant ce qui est programmé dans le microcontrôleur. Par exemple, la figure 6.4 illustre une sortie en forme d'onde carrée alors qu'à la figure 6.5 apparaît une onde "triangulaire par créneau" générée par le montage utilisé avec un programme approprié.

6.4 Conclusion sur les résultats

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de créer un convertisseur DC/DC en utilisant le concept de l'invention dans un montage à trois branches dans lesquelles plusieurs modules sont reliés entre-eux en série. De plus, il est montré que ce concept permet de générer des formes d'ondes diverses, ce qui confirme la possibilité de fabriquer des convertisseurs de toutes sortes. Cependant, des faiblesses dans le montage utilisé pour effectuer les tests n'ont pas permis d'exploiter ces convertisseurs au meilleur de leurs capacités avec de fortes puissances.

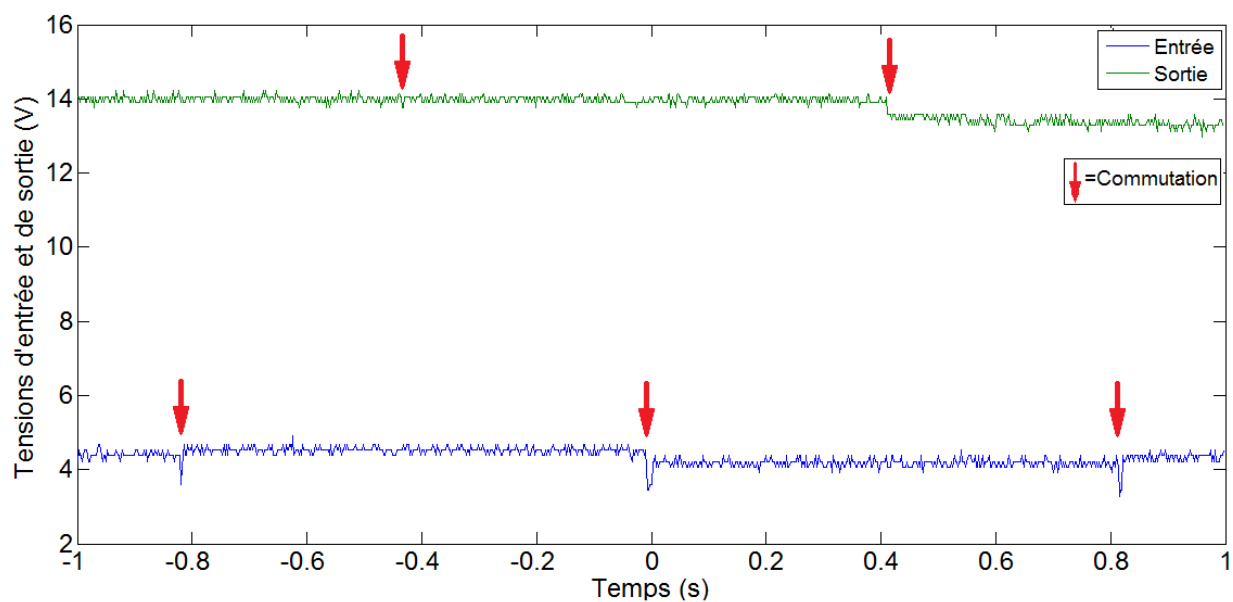


Figure 6.3 Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur à diodes Schottky avec charge de 14 ohms

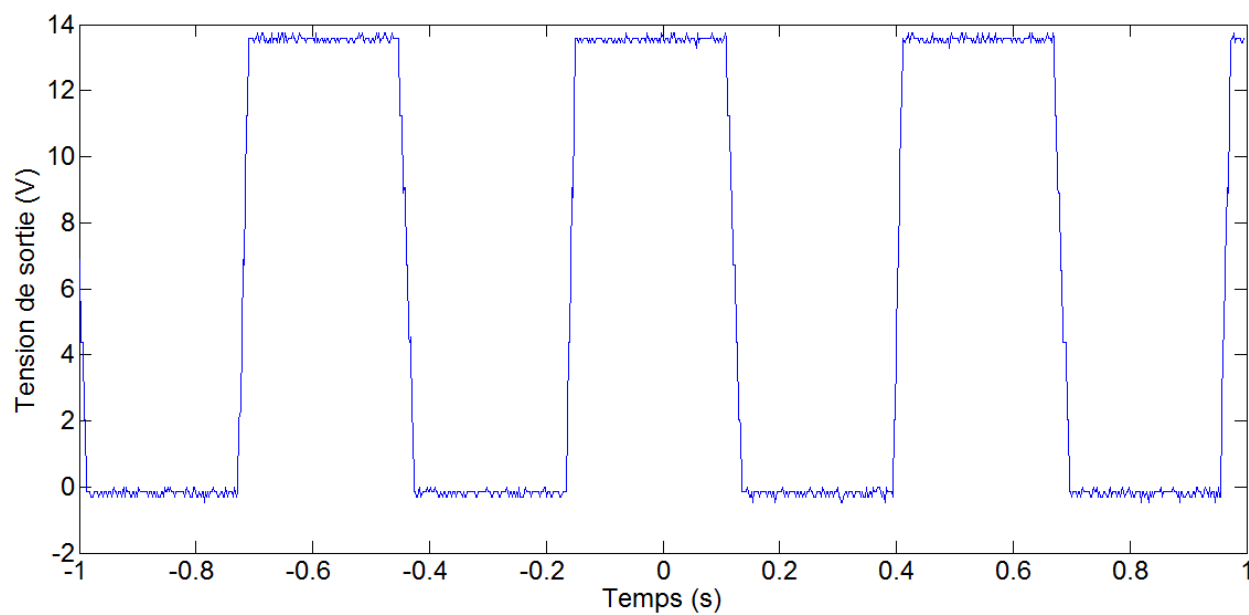


Figure 6.4 Tension de sortie du convertisseur formant une onde carrée

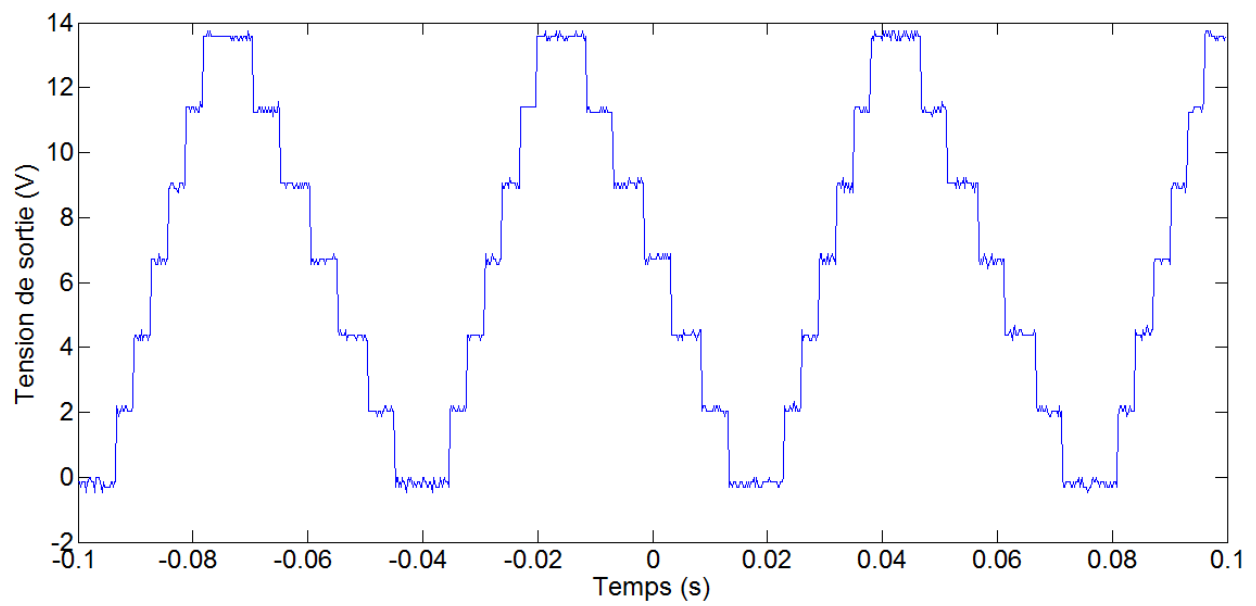


Figure 6.5 Tension de sortie du convertisseur formant une onde triangulaire par créneau

CHAPITRE 7

AMÉLIORATIONS POSSIBLES ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS

Les résultats de tests ont indiqué certaines lacunes à corriger lors de futurs essais du concept. D'autres améliorations sont possibles en augmentant l'envergure du projet et en y consacrant les ressources financières adéquates. En effet, les bénéfices réels d'un tel système apparaissent lorsqu'un grand nombre de modules sont assemblés ensemble, ce qui requiert des ressources substantielles. Ces ressources financières seront plus aisément obtenues en démontrant l'aspect économique du concept et les multiples perspectives d'applications qui sont possibles.

7.1 Améliorations à apporter au concept

Les résultats des tests ont montré que le montage utilisé montrait des faiblesses qui n'ont pas permis d'exploiter le concept au meilleur de ses capacités. Cela pourrait être corrigé en ciblant des composantes mieux adaptées aux objectifs à atteindre, ainsi qu'en créant un montage plus robuste, notamment à l'aide d'un PCB spécifiquement conçu pour la commutation entre les trois branches et les bornes d'entrée et de sortie. En effet, les tensions et courants qui passent par ces composantes de commutations sont importants ce qui est un facteur non-négligeable de perte d'efficacité.

Une autre avenue pour améliorer le concept est d'en augmenter l'envergure, c'est-à-dire réaliser un convertisseur qui contient beaucoup plus que six modules par branche. Cela permettrait non seulement d'augmenter le niveau de tension, mais permettrait également plus de latitude dans le choix d'utilisation des modules par le programme. En effet, il serait alors possible pour le programme de mettre à l'écart un module défectueux ou dont les limites de tension ont été dépassées sans compromettre ou même interrompre le fonctionnement du convertisseur. Le programme pourrait également faire des agencements plus élaborés des modules de façon à maintenir une précision plus fine quant aux tensions obtenues aux bornes des branches.

La gestion de la puissance en entrée et en sortie devrait également être intégrée dans un programme plus sophistiqué, et ce afin d'éviter une lente dérive des tensions à la hausse ou à la baisse. En effet, une telle dérive des tensions menerait inévitablement à un arrêt du convertisseur lors du dépassement des limites de tolérance des supercondensateurs. L'utilisation de

la “logique floue” (Fuzzy Logic) serait notamment envisageable pour implanter une telle gestion. Une envergure plus importante et une programmation plus flexible permet d’envisager le développement d’applications diverses.

7.2 Perspectives d’applications

Le jumelage des fonctions de stockage d’énergie et de conversion trouve son utilité dans plusieurs domaines. En fait, toutes les applications qui utilisent un convertisseur et qui pourraient profiter d’une fonction de lissage de la puissance dans le temps sont des candidats intéressants pour cette technologie. Deux exemples sont les éoliennes et la récupération d’énergie au freinage de véhicules. De plus, l’élimination des inductances pourrait permettre de réduire le poids d’un convertisseur. Le prix des inductances est influencé par leur poids en cuivre, ce qui constitue un argument économique en faveur du concept étudié dans ce mémoire, en plus d’économies possiblement générées par la combinaison de deux fonctions en un seul dispositif.

Un exemple de calcul du volume de supercondensateurs nécessaire à la récupération d’énergie de freinage dans le métro de Montréal est ici présenté afin d’illustrer la faisabilité d’utiliser ce concept, d’un point de vue de l’espace nécessaire dans la motrice.

La masse d’une motrice MR-73, utilisée dans le métro de Montréal depuis 1976 (lignes orange, jaune et bleue), est de 26 990 kg, et la vitesse de pointe d’environ 72 km/h, soit 20 m/s [11]. La capacité est de 160 passagers. En posant une masse de 80 kg par passager, la masse totale à freiner est d’environ 40 000 kg. L’énergie cinétique est calculée par :

$$E = \frac{mV^2}{2}. \quad (7.1)$$

Cela donne une énergie de 8000 kJ.

L’énergie d’un condensateur est calculée par :

$$E = \frac{CV^2}{2}. \quad (7.2)$$

Pour une tension de 2,7 V et une capacité de 350 F, cela donne 1275 J. Si on déduit l’énergie résiduelle d’un condensateur qui ne doit pas descendre sous 2.0 V, soit 700 J, cela

laisse 575 Joules utiles par supercondensateur.

On aura donc besoin de 14 000 supercondensateurs de 350 F pour récupérer toute l'énergie du freinage de la motrice MR-73. Considérant le diamètre de 33 mm et la hauteur de 65 mm, le volume nécessaire de supercondensateurs entre dans un mètre cube. À cela s'ajoute bien entendu le volume pour les circuits électroniques associés.

L'utilisation de supercondensateurs de plus grande capacité, certains atteignent les 5000 F, permettrait de réduire sensiblement la quantité nécessaire tout en gardant un volume de l'ordre de un mètre cube.

CHAPITRE 8

CONCLUSION

Ce mémoire de maîtrise a traité d'un dispositif de stockage d'énergie électrique novateur qui, agencé de certaines façons et commandé par un microcontrôleur, pourrait aussi agir comme divers types de convertisseurs de puissance électrique qui auraient une capacité d'emmagasiner de l'énergie. Les applications qui nécessitent l'usage de convertisseurs de puissance et une fonction lissage de la puissance dans le temps pourraient bénéficier d'une telle technologie. Le domaine de l'éolien et la récupération d'énergie au freinage de véhicules sont deux domaines où l'utilisation de cette technologie devrait s'avérer intéressante.

8.1 Synthèse des travaux

Le coeur du concept réside dans l'utilisation de supercondensateurs commutés de manière à pouvoir relier ceux-ci en série, créant une branche de supercondensateurs en série. Des transistors agissant comme interrupteurs permettent ainsi d'ajouter ou de retirer individuellement les supercondensateurs de la branche série, modifiant alors à volonté la tension aux bornes de cette branche. Un circuit de commande et de protection permet au module de recevoir les instructions du microcontrôleur et protège aussi les supercondensateurs contre le danger que leurs tensions ne dépasse leur limite de 2.7 volts.

La première étape dans la réalisation du projet fût de modéliser le circuit sur l'environnement Simulink du logiciel Matlab. Cette modélisation informatique visait à vérifier le bon fonctionnement de la logique de commande et de protection. Plusieurs des composantes ont été représentées par des modèles idéalisés de façon à simplifier la tâche, sans compromettre la validité du fonctionnement de la logique comme telle.

La deuxième étape a été de créer un module, sur breadboard pour commencer, puis sur PCB ensuite, afin d'en vérifier le bon fonctionnement selon un protocole de test pré-établi. Ces expérimentations ont permis de confirmer que les modules réagissaient bien de la façon attendue.

Une vingtaine de modules sur PCB ont enfin été construits pour pouvoir tester certains

concepts de convertisseurs les utilisant. Un microcontrôleur dsPic30F4013 a été programmé en langage Forth et utilisé à partir d'un PCB d'expérimentation dsPicDEM2 pour commander le tout. Les topologies retenues consistent en trois branches de trois modules en série chacune. Les trois branches sont commutées pour être en contact à tour de rôle avec soit la borne d'entrée ou la borne de sortie du convertisseur. Dans un des montages, les commutateurs sont des transistors BJT, permettant une conversion bidirectionnelle. La programmation est faite pour réaliser un convertisseur DC/DC bidirectionnel. Le deuxième montage utilise des diodes Schottky comme commutateurs, ne permettant que la réalisation d'un convertisseur DC/DC élévateur unidirectionnel.

Les résultats des essais montrent que le montage permet de réaliser un convertisseur DC/DC, transformant une certaine tension DC en entrée vers une autre tension DC en sortie, tel qu'espéré. Cependant, une faiblesse dans le circuit du montage n'a pas permis d'utiliser les convertisseurs à leur plein potentiel de puissance. Un autre programme permettant de générer des formes d'ondes diverses a été testé, démontrant que ce type de convertisseur peut être utilisé pour des applications AC dont les formes d'onde ne dépendront que de ce qui a été programmé.

8.2 Limitations de la solution proposée

Tel qu'énoncé précédemment, la performance des convertisseurs qui ont été testés a été limité par des faiblesses au niveau du montage du circuit de commutation des branches avec les bornes d'entrée et de sortie.

Une autre limitation résulte de la limite inférieure en tension de 2.0 V qui doit être maintenue pour la bonne marche du circuit. Cela réduit de façon non-négligeable la quantité de stockage d'énergie disponible pour utilisation par le dispositif. Certains correctifs pourraient sans doute être apportés pour modifier le niveau de cette limite.

Le fait que la tension aux bornes des branches de modules en série ne varie que par incréments de 2.5 V peut également être perçu comme une limitation pour certaines applications. Cependant, l'utilisation d'un plus grand nombre de modules en série ouvre la voie des solutions utilisant une programmation sophistiquée prévoyant un éventail de tensions disponibles variant entre 2.0 et 2.7 V. Des agencement judicieux entre supercondensateurs dont les tensions diffèrent intentionnellement pourraient alors permettre de réduire voire d'éliminer la réalité

de ces incréments.

L'ajout d'un inverseur de polarité est également nécessaire pour permettre à un convertisseur basé sur cette technologie de fournir un courant alternatif qui pourra passer d'une polarité positive à une polarité négative.

8.3 Améliorations futures

La réalisation d'expérimentations à plus grande échelle, c'est-à-dire avec un nombre beaucoup plus élevé de modules, permettrait de valider la valeur de cette technologie à son plein potentiel. Pour cela, il faudra également s'assurer de disposer d'un banc d'essai plus robuste avec des composantes mieux adaptées. De plus, il sera nécessaire de développer une programmation plus sophistiquée pour profiter pleinement de la flexibilité qu'offre ce concept.

RÉFÉRENCES

- [1] J. Kraus, *Electromagnetics*. McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [2] B. Conway, *Electrochemical Supercapacitors : Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Kluwer Academic/Plenum Publishing, 1999.
- [3] H. Becker, *Low Voltage Electrolytic Capacitor*. U.S. Patent 2,800,616, 1957.
- [4] G. Hostetter, *Fundamentals of Network Analysis*. Harper and Row, Publishers, 1980.
- [5] R. Dorf and J. Svoboda, *Introduction to Electric Circuits (eighth edition)*. John Wiley and Sons, Inc, 2010.
- [6] P. Barrade, S. Pittet, and A. Rufer, “Series connection of supercapacitors, with an active device for equalizing the voltages,” in *PCIM*, 2000.
- [7] D. Linzen, S. Buller, E. Karden, and R. De Doncker, “Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems,” in *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2005, pp. pp. 1135–1141.
- [8] Y. Diab, P. Venet, and G. Rojat, “Comparison of the Different Circuits Used for Balancing the Voltage of Supercapacitors : Studying Performance and Lifetime of Supercapacitors,” in *ESSCAP, Switzerland*, 2006.
- [9] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, *Power Electronics : Converters, Applications, and Design (third edition)*. John Wiley and Sons, 2003.
- [10] M. Liu, *Demystifying Switched-Capacitor Circuits*. Elsevier Inc., 2006.
- [11] P. Émile Boileau, J. Boutin, S. Rakheja, and H. Politis, “Évaluation de l’exposition aux vibrations globales du corps des opérateurs du métro de montréal et étude du comportement dynamique des motrices et de leur système de suspension,” Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Tech. Rep., 2005.

ANNEXE A

PROGRAMMES EN LANGAGE FORTH

Désignation des adresses pour les ports d'entrée et de sortie :

\$02c6 con trisb	\Détermine si port B est entrée ou sortie
\$02c7 con trisbh	
\$02c8 con portb	\Port B 8 derniers bits
\$02c9 con portbh	\8 bits hauts du port B
\$02de con trisf	\Détermine si port F est entrée ou sortie
\$02e0 con portf	\Port F
\$0280 con adcbuf0	\mémoire tampon conservant la valeur lue par l'adc 8 derniers bits
\$0281 con adcbuf0h	\mémoire tampon conservant la valeur lue par l'adc 4 bits "hauts"
\$02a0 con adcon1	\Adresse pour initialisation de l'ADC
\$02a1 con adcon1h	
\$02a2 con adcon2	
\$02a4 con adcon3	
\$02a6 con adchs	\Port auquel sera relié le ADC
\$02a8 con adpcfg	
\$02a9 con adpcfgh	
\$02c1 con trisah	
\$02c3 con portah	\16 bits hauts du port A

Déclaration des variables :

variable delta	\Spécifie le SC dans un module
variable posy	\Position y d'un module
variable posx	\Position x d'un module
2variable table2 #12 cells allot	\Variable matricielle contenant les tensions
variable table #12 cells allot	\Variable matricielle contenant les positions x et y
2variable valeuradc	\Variable double contenant tension lue par l'ADC
variable i	\Compteur
variable j	
variable y	\Position y d'un supercondensateur

variable x \Position x d'un supercondensateur
 variable notchanged
 2variable lmtsupmv \en millivolts ex #258
 2variable lmtinfmv \en millivolts ex #205
 2variable maxvoltmv \en millivolts ex #498
 2variable lmtsup
 2variable lmtinf
 variable alarm \arret du programme en cas de pepin
 variable nbentree \Nombre de SC en série dans branche entrée
 variable nbsortie \Nombre de SC en série dans branche sortie
 variable delay
 variable delay2
 variable limitping
 variable y16x 5 cells allot

Définitions des mots Forth servant au programme principal :

```
: allumer y c@ #16 * x c@ + portb c!;    \SC à position y mis en série ds branche x

: eteindre y c@ 1 + #16 * x c@ + 1 + portb c!;    \Retire le SC à position y de branche x

: reset #13 #16 * #13 + portb c!;    \12 pins utilisées des démultiplexeurs mises à 0

: lireadc %10 adcon1 mset    \Lecture de la tension par l'ADC du dsPic
20 ms    \Délai de 20 ms
%10 adcon1 mclr    \Initiation de la lecture de tension
begin %1 adcon1 mtst 1 = until    \Vérification que l'ADC ait fini sa mesure
adcbuf0h c@ #256 * adcbuf0 c@ + dup valeuradc 2!;    \Valeur enregistrée dans valeuradc
```

```

: tensions      \Lire toutes les tensions d'une branche
0 posy c!
0 i c!
begin          \Début boucle posy = 0 à 3
0 delta c!
    begin      \Début boucle delta = 0 à 4 par 2
    posy c@ 4 * delta c@ + y c!      \Définit position y
    posx c@ 4 * delta c@ + x c!      \Définit position x
    allumer      \Allumer le SC de position x et y
    delay c@ ms
    reset        \Remise à 0 des demux
    lireadc      \Lire la tension du SC
    eteindre      \Éteindre le SC de position x et y
    delay c@ ms
    reset        \Remise à 0 des demux
    x c@ table y c@ 2 / 0 + cells + c!      \valeur x inscrit dans table
    y c@ table y c@ 2 / #6 + cells + c!      \valeur y inscrit dans table
    valeuradc 2@ table2 y c@ cells + 2!      \valeuradc inscrit dans table2
    valeuradc 2@ drop lmtinf 2@ drop < if 1 alarm c! exit then
    valeuradc 2@ drop lmtsup 2@ drop > if 2 alarm c! exit then
    delta c@ 2 + delta c!
    i c@ 1 + i c!
    delta c@ 4 = until
posy c@ 1 + posy c!
posy c@ 3 = until;

```

```

: ordonner4      \algorithme d'ordonnancement "bubblesort"
begin
true notchanged c!
0 i c!
begin
table2 i c@ 2 * cells + 2@ drop table2 i c@ 1 + 2 * cells + 2@ drop > if
table2 i c@ 2 * cells + 2@ table2 i c@ 1 + 2 * cells + 2@
table2 i c@ 2 * cells + 2! table2 i c@ 1 + 2 * cells + 2!

```

```

table i c@ 0 + cells + c@ table i c@ 1 + cells + c@
table i c@ 0 + cells + c! table i c@ 1 + cells + c!
table i c@ 6 + cells + c@ table i c@ 7 + cells + c@
table i c@ 6 + cells + c! table i c@ 7 + cells + c!
false notchanged c! then
i c@ 1 + i c!
i c@ 5 = until
notchanged c@ until;      \Arrêt lorsque classé ordre croissant

```

```

: eteindrecolonne      \eteint toutes les cellules d'une colonne
0 posy c!

```

```

begin      \boucle pour posy=0 à 3 (y=0 à 6)
    0 delta c!      \1er SC du module no. posy
    posy c@ 4 * delta c@ + y c!      \Détermine y
    posx c@ 4 * delta c@ + x c!      \Détermine x
    eteindre      \Éteint le SC de position y ds branche x
    delay c@ ms
    reset
    2 delta c!      \2ème SC du module no. posy
    posy c@ 4 * delta c@ + y c!      \Détermine y
    posx c@ 4 * delta c@ + x c!      \Détermine x
    eteindre      \Éteint le SC de position y ds branche x
    delay c@ ms
    reset
    posy c@ 1 + posy c!
posy c@ 3 = until;

```

```

: recharge3
0 i c!      \Compteur i mis à 0
begin      \Début boucle pour i=0 à nbentree
table i c@ 0 + cells + c@ x c!      \Lire position x de l'item i
table i c@ #6 + cells + c@ y c!      \Lire position y de l'item i
allumer      \allumer le SC de position y ds branche x
delay c@ ms
reset
i c@ 1 + i c!      \incremente i

```

```
i c@ nbentree c@ = until;      \Fin boucle sur i
```

```
: sortie3
```

```
6 nbsortie c@ - i c!      \Initialise compteur i à 6-nbsortie
begin      \Début boucle pour i=(6-nbsortie) à 6
table i c@ 0 + cells + c@ x c!      \Lire x dans variable table
table i c@ #6 + cells + c@ y c!      \Lire y dans variable table
allumer      \Allumer SC de position y ds branche x
delay c@ ms
reset
i c@ 1 + i c!      \incrémente i
6 i c@ = until;      \arrêt quand i=6
```

```
: abc3
```

```
1 posx c!      \posx=1 (colonne b)
#11 adchs c!      \ADC relié à colonne 1
eteindrecolonne      \Eteindre colonne 1
tensions      \Lire toutes les tensions
ordonner2      \Classer ordre croissant
sortie3      \Allume les nbsortie SC les plus chargés
%1000 portf mset      \Branche b reliée à borne sortie
%100000 portf mclr;      \Branche c débranchée de sortie
```

```
: acb3
```

```
2 posx c!      \posx=2 (colonne c)
#12 adchs c!      \ADC relié à colonne 2
eteindrecolonne      \Eteindre colonne 2
tensions      \Lire toutes les tensions
ordonner2      \Classer ordre croissant
recharge3      \Allume les nbentree SC les moins chargés
%10000 portf mset      \Branche c reliée à borne entrée
%1 portf mclr;      \Branche a débranchée de entrée
```

```
: cab3
```

```
0 posx c!      \posx=0 (colonne a)
#10 adchs c!      \ADC relié à colonne 0
```

```

eteindrecolonne    \Eteindre colonne 0
tensions           \Lire toutes les tensions
ordonner2          \Classer ordre croissant
sortie3            \Allume les nbsortie SC les plus chargés
%10 portf mset      \Branche a reliée à borne sortie
%1000 portf mclr ;   \Branche b débranchée de sortie

```

```
: cba3
```

```

1 posx c!          \posx=1 (colonne b)
#11 adchs c!        \ADC relié à colonne 1
eteindrecolonne     \Eteindre colonne 1
tensions            \Lire toutes les tensions
ordonner2           \Classer ordre croissant
recharge3           \Allume les nbentree SC les moins chargés
%100 portf mset      \Branche b reliée à borne entrée
%10000 portf mclr ;  \Branche c débranchée de entrée

```

```
: bca3
```

```

2 posx c!          \posx=2 (colonne c)
#12 adchs c!        \ADC relié à colonne 2
eteindrecolonne     \Eteindre colonne 2
tensions            \Lire toutes les tensions
ordonner2           \Classer ordre croissant
sortie3             \Allume les nbsortie SC les plus chargés
%100000 portf mset   \Branche c reliée à borne sortie
%10 portf mclr ;     \Branche a débranchée de sortie

```

```
: bac3
```

```

0 posx c!          \posx=0 (colonne a)
#10 adchs c!        \ADC relié à colonne 0
eteindrecolonne     \Eteindre colonne 0
tensions            \Lire toutes les tensions
ordonner2           \Classer ordre croissant
recharge3           \Allume les nbentree SC les moins chargés
%1 portf mset        \Branche a reliée à borne entrée
%100 portf mclr ;    \Branche b débranchée de entrée

```

Programme principal :

```

: dcdc2
0 posx c!
0 posy c!
0 x c!
0 y c!
0 alarm c!
0 trisb c!      \Port B sortie
0 trisf c!      \Port F sortie
0 trisah c!
0 portah c!
8 trisah c!
ca $0770 c!      \Permet d'actionner l'ADC
#32 adcon3 c!      \AD control register pour format
%10000000 adcon1h c!
0 portf c!
0 portb c!
begin      \Boucle jusqu'à interruption
    abc3
    acb3
    cab3
    cba3
    bca3
    bac3
    portah c@ 8 = if 3 alarm c! exit then      \Interruption si port A haut=8
alarm 0 > until
alarm c@ 1 = if ." sous 2v " then
alarm c@ 2 = if ." surtension " then
alarm c@ 3 = if ." interruption " then
." termine ";

```

Programme principal version écourtée :

```

: dcdc3
0 posx c!
0 trisb c!      \Port B sortie
0 trisf c!      \Port F sortie
begin          \Boucle jusqu'à interruption
    abc3
    acb3
    cab3
    cba3
    bca3
    bac3
    portah c@ 8 = if exit then      \Interruption si port A haut=8
0 until;

```

Programme pour créer du AC en sortie :

```

: ac
0 trisb c!
0 trisf c!
begin          \Boucle jusqu'à interruption
    eteindrecolonne
    delay4 c@ ms      \Délai détermine durée de vallée
    allumercolonne
    delay4 c@ ms      \Délai détermine durée de sommet
    portah c@ 8 = if exit then      \Interruption si port A haut=8
0 until;

```

Programmes pour convertisseur DC/DC élévateur unidirectionnel avec diodes Schottky

```

: tensddinit      \Initiation de la lecture des tensions
0 posy c!
0 delta c!
begin

```

```

posy c@ 4 * delta c@ + y c!
posx c@ 4 * delta c@ + x c!
allumer      \Allume les deux SC du module en posy=0
reset
delta c@ 2 + delta c!
delta c@ 4 = until
1 posy c!
begin
0 delta c!
begin      \Boucle pour posy=1 à 2
posy c@ 4 * delta c@ + y c!
posx c@ 4 * delta c@ + x c!
eteindre    \Éteint les SC des modules en posy=1 et 2
reset
delta c@ 2 + delta c!
i c@ 1 + i c!
delta c@ 4 = until
posy c@ 1 + posy c!
posy c@ 3 = until;

: tensdiod      \Lecture des tensions des SC
tensddinit
1 posy c!      \Commence par lire tensions des SC de posy=1
begin      \Boucle posy=1 à 2 inclus
0 delta c!
begin
posy c@ 4 * delta c@ + y c!      \Détermine y
posx c@ 4 * delta c@ + x c!      \Détermine x
allumer      \Allume le SC
reset
lireadc      \Lire tension du SC en y sur branche x
valeuradc 2@
drop
y c@ 4 - y c!
eteindre      \Éteint le SC 4 positions y plus bas

```

```

reset
lireadc      \Lire tension
valeuradc 2@
drop
- dup valeuradc 2!      \Détermine tension par différence
x c@ table y c@ 2 / 0 + cells + c!      \Inscrit x dans table
y c@ table y c@ 2 / #6 + cells + c!      \Inscrit y dans table
valeuradc 2@ table2 y c@ cells + 2!      \Inscrit tension dans table2
valeuradc 2@ drop lmtinf 2@ drop < if 1 alarm c! exit then
valeuradc 2@ drop lmtsup 2@ drop > if 2 alarm c! exit then
delta c@ 2 + delta c!
delta c@ 4 = until
posy c@ 1 + posy c!
posy c@ 3 = until

0 posy c!
0 delta c!
begin      \Boucle pour lire tensions module posy=0
posy c@ 4 * delta c@ + y c!
posx c@ 4 * delta c@ + x c!
allumer
reset
lireadc
valeuradc 2@
drop
y c@ 8 + y c!
eteindre
reset
lireadc
valeuradc 2@
drop
- dup valeuradc 2!      \Détermine tension par différence
x c@ table y c@ 2 / 0 + cells + c!      \Inscrit x dans table
y c@ table y c@ 2 / #6 + cells + c!      \Inscrit y dans table
valeuradc 2@ table2 y c@ cells + 2!      \Inscrit tension dans table2
valeuradc 2@ drop lmtinf 2@ drop < if 1 alarm c! exit then

```

```

valeuradc 2@ drop lmtsup 2@ drop > if 2 alarm c! exit then
delta c@ 2 + delta c!
delta c@ 4 = until;

```

```

: recharged      \Branche les SC les moins chargés en série
0 i c!
begin          \Boucle pour allumer les SC moins chargés
table i c@ 0 + cells + c@ x c!
table i c@ #6 + cells + c@ y c!
allumer
delay c@ ms
reset
i c@ 1 + i c! \incrimente i
i c@ nbentree c@ = until
begin          \Boucle pour éteindre les autres SC
table i c@ 0 + cells + c@ x c!
table i c@ #6 + cells + c@ y c!
eteindre
delay c@ ms
reset
i c@ 1 + i c! \incrimente i
i c@ 6 = until;

```

```

: allumercolonne \Allume toutes les cellules d'une colonne
0 posy c!
begin          \Boucle posy=0 à 3
0 delta c!      \1er SC d'un module
posy c@ 4 * delta c@ + y c!      \Détermine y
posx c@ 4 * delta c@ + x c!      \Détermine x
allumer        \Allumer le SC position y ds colonne x
delay3 c@ ms
reset
2 delta c!      \2ème SC d'un module
posy c@ 4 * delta c@ + y c!      \Détermine y

```

```

posx c@ 4 * delta c@ + x c!      \Détermine x
allumer Allumer le SC position y ds colonne x
delay3 c@ ms
reset
posy c@ 1 + posy c!
posy c@ 3 = until ;

```

```

: abcd
1 posx c!      \posx=1 (colonne b)
#11 adchs c!    \ADC relié à colonne 1
tensdiod       \Lire tensions par différences
ordonner4      \Classer en ordre croissant de tensions
allumercolonne; \Allumer la colonne en entier

```

```

: acbd
2 posx c!      \posx=2 (colonne c)
#12 adchs c!    \ADC relié à colonne 2
tensdiod       \Lire tensions par différences
ordonner4      \Classer en ordre croissant de tensions
recharged;     \Allumer le SC le moins chargé

```

```

: cabd
0 posx c!      \posx=0 (colonne a)
#10 adchs c!    \ADC relié à colonne 0
tensdiod       \Lire tensions par différences
ordonner4      \Classer en ordre croissant de tensions
allumercolonne; \Allumer la colonne en entier

```

```

: cbad
1 posx c!      \posx=1 (colonne b)
#11 adchs c!    \ADC relié à colonne 1
tensdiod       \Lire tensions par différences

```

```
ordonner4      \Classer en ordre croissant de tensions
recharged;     \Allumer le SC le moins chargé
```

```
: bcad
2 posx c!      \posx=2 (colonne c)
#12 adchs c!   \ADC relié à colonne 2
tensdiod       \Lire tensions par différences
ordonner4      \Classer en ordre croissant de tensions
allumercolonne; \Allumer la colonne en entier
```

```
: bacd
0 posx c!      \posx=0 (colonne a)
#10 adchs c!   \ADC relié à colonne 0
tensdiod       \Lire tensions par différences
ordonner4      \Classer en ordre croissant de tensions
recharged;     \Allumer le SC le moins chargé
```

```
: quickstart   \Initialisation rapide de variables
ca $0770 c!    \Permet d'actionner l'ADC
#32 adcon3 c!
%10000000 adcon1h c! \Initier l'ADC
0 trisb c!
0 trisf c!
0 trisah c!
0 portah c!
8 trisah c!
0 portf c!
0 portb c!
100 limitping c!
#200 #200 lmtinf 2!
#540 #540 lmtsup 2!;
```

```

: dcdiode4      \Programme principal convertisseur à diodes
quickstart
begin          \Début boucle
abcd
acbd
cabd
cbad
bcad
bacd
portah c@ 8 = if exit then      \Fin de boucle par interruption au port A
0 until;

```

ANNEXE B

Glossaire des mots créés en langage Forth

allumer (- - -)

Envoie une valeur 1 - 0 au verrou (“RS latch”) correspondant à la position du supercondensateur numéro y afin qu’il soit branché en série dans la branche x. La position y est déterminée par les 4 derniers bits du port B, et la position x par les 4 premiers bits du port B, ce pourquoi la valeur est multipliée par 16.

allumercolonne (- - -)

Envoie une valeur 1 - 0 aux verrous (“RS latch”) correspondant à la position de chacun des supercondensateurs de la branche x afin qu’ils soient branchés à la série dans la branche x. La position y est déterminée par les 4 derniers bits du port B, et la position x par les 4 premiers bits du port B, ce pourquoi la valeur est multipliée par 16.

eteindre (- - -)

Envoie une valeur 0 - 1 au verrou (“RS latch”) correspondant à la position du supercondensateur numéro y afin qu’il soit débranché de la série dans la branche x. La position y est déterminée par les 4 derniers bits du port B, et la position x par les 4 premiers bits du port B, ce pourquoi la valeur est multipliée par 16.

eteindrecolonne (- - -)

Envoie une valeur 0 - 1 aux verrous (“RS latch”) correspondant à la position de chacun des supercondensateurs de la branche x afin qu’ils soient débranchés de la série dans la branche x. La position y est déterminée par les 4 derniers bits du port B, et la position x par les 4 premiers bits du port B, ce pourquoi la valeur est multipliée par 16.

lireadc (- - -)

Effectue une lecture de la tension à l’aide du ADC du microcontrôleur. C’est une valeur numérique de 12 bits qui est enregistrée dans la variable

"valeuradc" .

ordonner4 (- - -)

Algorithme de type "bubblesort" qui classe les tensions des supercondensateurs d'une branche donnée en ordre croissant. Les valeurs des tensions sont lues dans la variable matricielle "table2" et réinscrites dans cette même variable après l'opération. La variable "table" contient des valeurs numériques en double longueur. Les coordonnées en x et y sont contenues dans la variable "table".

recharge3 (- - -)

Identifie quels sont les supercondensateurs les moins chargés à partir des données de la variable matricielle "table2" et leurs coordonnées en x et y dans la variable matricielle "table". Ensuite, ces supercondensateurs moins chargés sont branchés en série dans la branche de position x avec le mot "allumer". Le nombre de supercondensateurs utilisés est déterminé par la variable "nbentree" afin de créer une tension telle que voulue en entrée selon la tension de la source.

recharged (- - -)

Identifie le supercondensateur le moins chargé à partir des données de la variable matricielle "table2" et ses coordonnées en x et y dans la variable matricielle "table". Ensuite, ce supercondensateurs le moins chargé est branché en série dans la branche de position x avec le mot "allumer". Un seul condensateur est utilisé de créer une tension d'environ 2,5 V en entrée selon la tension de la source. Mot utilisé seulement avec le convertisseur DC/DC unidirectionnel.

reset (- - -)

Mets toutes les 12 sorties utilisées par chacun des deux multiplexeurs à 0, en y envoyant une valeur de 13, pour les 4 bits "bas" et de 16 fois 13, pour les 4 bits "hauts", par l'intermédiaire du port B.

sortie3 (- - -)

Identifie quels sont les supercondensateurs les plus chargés à partir des données de la variable matricielle "table2" et leurs coordonnée en x et y

dans la variable matricielle “table”. Ensuite, ces supercondensateurs les plus chargés sont branchés en série dans la branche de position x avec le mot “allumer”. Le nombre de supercondensateurs utilisés est déterminé par la variable “nbsortie” afin de créer une tension telle que désirée en sortie pour alimenter la charge.

tensddinit (- - -)

Initiation de la procédure de lecture des tensions pour le convertisseur à diodes. Les deux supercondensateurs du module de position posy=0 de la branche x sont allumés alors que tous les autres supercondensateurs sont éteints par la suite.

tensdiod (- - -)

Effectue la lecture de chacune des tensions des 6 supercondensateurs de la branche x. Insère les valeurs de tensions contenues par la variable “valeuradc” dans la matrice “table2”. Les valeurs des positions x et de y correspondantes sont inscrites dans la variable matricielle “table”. La lecture des tensions est faite par différence pour le convertisseur DC/DC à diodes.

tensions (- - -)

Effectue la lecture de chacune des tensions des 6 supercondensateurs de la branche x. Insère les valeurs de tensions contenues par la variable “valeuradc” dans la matrice “table2”. Les valeurs des positions x et de y correspondantes sont inscrites dans la variable matricielle “table”.

/pagebreak

Blocs des programmes principaux :

abc3 (- - -)

La branche b (posx=1) est la branche tampon. La branche a (posx=0) est reliée à la borne d’entrée. La borne c (posx=2) est reliée à la borne de sortie. Les supercondensateurs de la branche b sont éteints un à un puis la tension de chacun d’eux est mesurée. L’algorithme “Bubblesort” les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle “table2” et les coordonnées en x et y dans “table”. Les BJT effectuent la commutation pour relier b en sortie puis

y débrancher c. Le port F se voit attribuer la valeur binaire : 001001

acb3 (- - -)

La branche c (posx=2) est la branche tampon. La branche a (posx=0) est reliée à la borne d'entrée. La borne b (posx=1) est reliée à la borne de sortie. Les supercondensateurs de la branche c sont éteints un à un puis la tension de chacun d'eux est mesurée. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". Les BJT effectuent la commutation pour relier c en entrée puis y débrancher a. Le port F se voit attribuer la valeur binaire : 011000

cab (- - -)

La branche a (posx=0) est la branche tampon. La branche c (posx=2) est reliée à la borne d'entrée. La borne b (posx=1) est reliée à la borne de sortie. Les supercondensateurs de la branche a sont éteints un à un puis la tension de chacun d'eux est mesurée. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". Les BJT effectuent la commutation pour relier a en sortie puis y débrancher b. Le port F se voit attribuer la valeur binaire : 010010

cba3 (- - -)

La branche b (posx=1) est la branche tampon. La branche c (posx=2) est reliée à la borne d'entrée. La borne a (posx=0) est reliée à la borne de sortie. Les supercondensateurs de la branche b sont éteints un à un puis la tension de chacun d'eux est mesurée. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". Les BJT effectuent la commutation pour relier b en entrée puis y débrancher c. Le port F se voit attribuer la valeur binaire : 000110

bca3 (- - -)

La branche c (posx=2) est la branche tampon. La branche b (posx=1) est reliée à la borne d'entrée. La borne a (posx=0) est reliée à la borne de sortie. Les supercondensateurs de la branche c sont éteints un à un puis

la tension de chacun d'eux est mesurée. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". Les BJT effectuent la commutation pour relier c en sortie puis y débrancher a. Le port F se voit attribuer la valeur binaire : 100100

bac3 (- - -)

La branche a (posx=0) est la branche tampon. La branche b (posx=1) est reliée à la borne d'entrée. La borne c (posx=2) est reliée à la borne de sortie. Les supercondensateurs de la branche a sont éteints un à un puis la tension de chacun d'eux est mesurée. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". Les BJT effectuent la commutation pour relier a en entrée puis y débrancher b. Le port F se voit attribuer la valeur binaire : 100001

abcd (- - -)

La branche b (posx=1) est la branche tampon. La branche a (posx=0) est reliée à la borne d'entrée. La borne c (posx=2) est reliée à la borne de sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche b sont mesurées par tensdiod. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". La colonne b est ensuite allumée en entier afin que la diode la relie à la borne de sortie.

acb3 (- - -)

La branche c (posx=2) est la branche tampon. La branche a (posx=0) est reliée à la borne d'entrée. La borne b (posx=1) est reliée à la borne de sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche b sont mesurées par tensdiod. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". Tous les supercondensateurs de c sont ensuite éteints sauf le moins chargé, afin qu'il soit relié par la diode à la borne d'entrée.

cab (- - -)

La branche a (posx=0) est la branche tampon. La branche c (posx=2) est reliée à la borne d'entrée. La borne b (posx=1) est reliée à la borne de sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche b sont mesurées par tensdiod. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". La colonne a est ensuite allumée en entier afin que la diode la relie à la borne de sortie.

cba3 (- - -)

La branche b (posx=1) est la branche tampon. La branche c (posx=2) est reliée à la borne d'entrée. La borne a (posx=0) est reliée à la borne de sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche b sont mesurées par tensdiod. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". Tous les supercondensateurs de b sont ensuite éteints sauf le moins chargé, afin qu'il soit relié par la diode à la borne d'entrée.

bca3 (- - -)

La branche c (posx=2) est la branche tampon. La branche b (posx=1) est reliée à la borne d'entrée. La borne a (posx=0) est reliée à la borne de sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche b sont mesurées par tensdiod. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". La colonne c est ensuite allumée en entier afin que la diode la relie à la borne de sortie.

bac3 (- - -)

La branche a (posx=0) est la branche tampon. La branche b (posx=1) est reliée à la borne d'entrée. La borne c (posx=2) est reliée à la borne de sortie. Les tensions des supercondensateurs de la branche b sont mesurées par tensdiod. L'algorithme "Bubblesort" les classe en ordre croissant de tension. Les valeurs des tensions se trouvent dans la variable matricielle "table2" et les coordonnées en x et y dans "table". Tous les supercondensateurs de a sont ensuite éteints sauf le moins chargé, afin qu'il soit relié par la diode à la borne d'entrée.

Programmes principaux :

ac (- - -)

Programme principal de fonctionnement créant une sortie AC.

dc2dc (- - -)

Programme principal de fonctionnement du convertisseur DC/DC bidirectionnel utilisant les BJTs.

dc3dc (- - -)

Programme principal écourté de fonctionnement du convertisseur DC/DC bidirectionnel utilisant les BJTs.

dc4diode (- - -)

Programme principal de fonctionnement du convertisseur unidirectionnel utilisant les diodes Schottky.